

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящее время создалась критическая ситуация, когда строительным объектам все более угрожает разрушение, вызванное экологическими проблемами городов. К традиционным причинам, таким как ошибки при проектировании, возведении и реконструкции зданий, воздействие градостроительной и хозяйственной деятельности, добавились чрезмерные нагрузки со стороны загрязненной окружающей среды. Это привело к тому, что в механизме коррозионного разрушения строительных материалов и конструкций биохимический характер начинает играть определяющую роль.

В условиях городской среды биохимическая коррозия приводит к повреждению как наружных, так и внутренних стен и других частей зданий. Этому в значительной мере способствует загрязнение почвенной экосистемы. В результате техногенного воздействия в почвы, грунты и подземные воды в избытке поступают органические соединения. Поэтому основные микробные процессы в геологической среде города определяются гетеротрофной микрофлорой, развивающейся на органике.

В крупных промышленных городах мощным загрязнителем также являются соединения серы. Попадая в почву, воду и атмосферу, эти соединения вовлекаются в цикл превращений в аэробном и анаэробном блоках микробной системы. В анаэробной зоне образуется сероводород. В аэробной зоне развиваются тионовые бактерии, вызывающие сернокислотную коррозию цементного камня.

Классификация микроорганизмов

Микроорганизмы — наиболее многочисленные обитатели биосферы, занимающие все доступные для жизни уголки планеты. Повсеместное распространение микроорганизмов обусловлено их малыми размерами, позволяющими легко переноситься с потоками воды и воздуха, разнообразием и гибкостью метаболизма, устойчивостью к неблагоприятным факторам среды.

Микроорганизмы достаточно близки по строению и химическому составу к животным и растениям. Бактериальная клетка состоит из оболочки, цитоплазмы, ядерного аппарата, цитоплазматических включений. Оболочка защищает клетку от воздействия внешней среды (выдерживает осмотическое давление до 600 кПа). С внутренней стороны оболочка имеет мембрану, являющуюся носителем ферментов, и способствует выделению продуктов обмена. Цитоплазма обеспечивает синтез белков и ферментов, а также дыхательные процессы. В ядерном аппарате сконцентрирована дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), которая является носителем наследственных свойств клетки и контролирует синтез белков. Грибы относятся к растительным организмам. Они образуют две большие группы: макрофиты (например, съедобные грибы) и микрофиты, растущие в виде пушистых паутинообразных образований. Строение клетки микроскопических грибов сходно со строением клетки бактерий. Отличительным признаком грибов является наличие мицелия (грибницы), которые состоят из тончайших ветвящихся нитей — гиф. На особых нитях (ответвлениях) развиваются споры (конидии или семя), служащие для размножения и сохранения организмов в неблагоприятных условиях. У бактерий споры служат лишь для выживания в неблагоприятных условиях.

Основными элементами, входящими в состав клеток микроорганизмов, являются сухое вещество (в состав которого входят соединения элементов углерода, кислорода, водорода, азота, серы, фосфора, магния, калия, железа, кальция) — 20-25% и вода, в которой растворены сухие компоненты.

Актиномицеты — группа микроорганизмов, занимающая промежуточное положение между бактериями и мицелиальными грибами. По строению и химическому составу их клетки напоминают бактерии, а по способности образовывать мицелий и характеру размножения — грибы. Колонии актиномицетов представляют сложную систему гиф различной длины и толщиной 0,5-1,2 мкм. Актиномицеты участвуют в процессе биоповреждений наряду с грибами и бактериями. Однако они растут медленнее по сравнению с бакте-

риями и грибами, в связи с чем оказываются в невыгодном положении и уступают в борьбе за легкодоступные питательные вещества. Некоторые виды актиномицетов могут рассматриваться как перспективные при разработке биохимических методов защиты от биоповреждений, вызываемых бактериями, т. к. в продуктах жизнедеятельности актиномицетов имеются соединения, токсичные для бактерий и других микроорганизмов.

Питание микроорганизмов осуществляется в результате диффузии растворенных веществ в клетку за счет разных их концентраций внутри и вне организма. Причем, мембрана клетки поглощает из растворов нужные вещества, задерживая вредные.

Микроорганизмы классифицируют по таким признакам, как тип питания; отношение к кислороду, температуре.

Классификация микроорганизмов по типу питания

Гетеротрофы – организмы, использующие для питания только или преимущественно органические вещества, произведенные другими видами, не способные синтезировать вещества для построения своего тела из неорганических веществ. К гетеротрофам относятся человек, все животные, паразитарные растения (петров крест, заразиха и др.), грибы и подавляющее большинство микроорганизмов.

Хемотротрофы – организмы, получающие энергию в результате окислительно-восстановительных реакций, окисляя химические соединения, богатые энергией — хемосинтеза (как неорганические- например молекулярный водород, серу, так и органические- углеводы, жиры, белки, парафины и более простые органические соединения),

Фототрофы – это организмы, способные преобразовывать энергию света в энергию химических связей, используемую затем для синтеза органических веществ из неорганических.

Классификация микроорганизмов по отношению к кислороду

Аэробы – микроорганизмы, жизнедеятельность которых протекает только в присутствии свободного кислорода. Такие условия характерны для

поверхности суши, вод неглубоких морей, зон аэрации, грунтовых вод. Аэробы играют большую роль в процессе метаморфизма грунтовых вод.

Анаэробы – организмы, развивающиеся в отсутствии свободного кислорода. Энергию для жизнедеятельности они получают из кислородсодержащих соединений или минеральных солей, например, нитратов, сульфатов, восстанавливая их до нитритов или аммиака, до свободного сероводорода или сульфидов. Анаэробы играют важную роль в процессе формирования химического состава грунтовых вод. Так, процессы сульфатредукции приводят к появлению сероводорода, уменьшению и полному исчезновению сульфатов, осаждению металлов в воде в виде сульфидов. Анаэробы распространены в глубоких подземных водах.

Классификация микроорганизмов по отношению к температуре

Психрофилы – организмы, нормально существующие и размножающиеся при относительно низких температурах (обычно не выше 10 °С).

Мезофилы – организмы, нормально существующие и размножающиеся при средних температурах (20-40 °С).

Термофилы – организмы, живущие при относительно высоких температурах свыше 45 °С.

Классификация микроорганизмов по донорам (источникам) электронов, необходимых для многих клеточных процессов.

Литотрофы — организмы, для которых донорами электронов являются неорганические вещества.

Органотрофы — организмы, для которых источниками электронов являются органические соединения.

Повсеместное распространение микроорганизмов в природе и их способность использовать в процессе жизнедеятельности разнообразные органические и минеральные соединения определяют их важную роль в геологических и геохимических процессах (круговорот углерода, азота, серы, фосфора, кремния и др. элементов). В подземных водах наибольшее распространение получили бактерии, роль которых в различных гидрохимических про-

цессах чрезвычайно велика. В загрязненных водах развиваются болезнетворные бактерии.

**Виды микроорганизмов, наиболее часто участвующих
в процессах коррозии строительных материалов**

Зеленые водоросли, цианобактерии. Энергию и углерод для построения собственного организма, подобно растению, они получают при фотосинтезе с участием солнечной энергии и CO_2 .

Многие виды бактерий и грибов, которые являются минерализаторами органического материала.

Специальные *анаэробные группы бактерий*, т. е. те, которые действуют при отсутствии кислорода воздуха. К ним относятся бактерии, восстанавливающие нитраты и сульфаты.

При обследовании биоповреждений материалов необходима идентификация этих групп микроорганизмов и изучение механизма их воздействия на строительные материалы.

Необходимые факторы развития микроорганизмов в материале

Факторы	Микроорганизмы			
	Водоросли, лишайники (фототрофные организмы)	Грибы, некоторые бактерии (гетеротрофные организмы)	Окислители серы (литотрофные бактерии)	Восстановители сульфата и нитрата (анаэробные бактерии)
Вода	+	+	+	+
Свет	+	-	-	-
Воздух	+	+	+	-
Органические вещества (источники углерода)	-	+	-	+

Например, отечественная и зарубежная статистика показывает, что на предприятиях молочной промышленности наибольшее повреждающее воздействие оказывают мицелиальные грибы. В результате действия грибов может происходить:

- механическое разрушение за счет разрастающегося их мицелия, внедрения гиф в материал вследствие высокого давления их вершечных

клеток, расширения и сжатия микробных клеток, а также накопления в результате жизнедеятельности микроорганизмов воды, замерзание и оттаивание которой усиливает разрушение материала;

- изменение физических, химических и механических свойств материала за счет выделения плесневыми грибами продуктов метаболизма: воды, CO_2 , аммиака, сульфидов, минеральных и органических кислот, перекиси водорода, окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов (диссимиляционный процесс биоповреждений);

- использование микроорганизмами компонентов материала в качестве источников энергии — пищи (ассимиляционный процесс биоповреждений);

- окрашивание (появление разноцветных пятен, что обуславливается наличием небольшого количества соединений цинка, кальция, железа и магния, вызывающих пигментообразование у грибов).

Обычно эти процессы происходят одновременно.

Микробиотическое заселение может происходить при определенных специфических условиях: наличие в строительном материале неорганических и органических веществ, питательной среды; уровень pH; окислительно-восстановительный потенциал среды; влажность; температура.

Стадии заселения строительных материалов микроорганизмами:

1. Заселение микроорганизмов на поверхности материала.
2. Образование колоний микроорганизмов и накопление продуктов их метаболизма.
3. Стимулирование процессов биоразрушения за счет одновременного воздействия микроорганизмов, влажности, температуры, химически агрессивных сред.

Интенсивность протекания данных процессов определяется структурой и химическим составом материала, технологией изготовления, степенью старения, наличием в материале минеральных и органических загрязнений, биотоксичных компонентов.

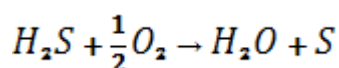
Механизм биоповреждений кальций содержащих материалов по систематизации английских специалистов Э. Мэй и Ф. Дж. Льюис.



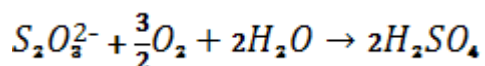
Из этой схемы видно, что при воздействии на бетон продуктов метаболизма микроорганизмов имеет место биохимическая коррозия. При этом микроорганизмы, поселяясь на поверхности материала, образуют устойчивое микробиотическое сообщество. Устойчивость этих сообществ определяется в соответствии с законами экологии, как многообразием присутствующих в них видов микроорганизмов, так и загрязнением окружающей среды вредными веществами — прежде всего соединениями C, N, S и др. Грибы, поселяясь на поверхности цементного камня, уменьшают pH среды таким образом, что создают оптимальную для своего развития кислотность среды. Определенное влияние на разрушение бетона оказывает рост биомассы грибов и создаваемое ею механическое давление на поверхность пор.

Продукты метаболизма тионовых бактерий

Окисление сероводорода:

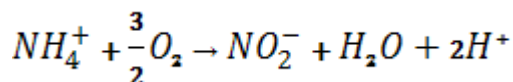


Окисление серы и тиосульфата в аэробных условиях:

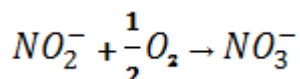


Продукты метаболизма нитрифицирующих бактерий

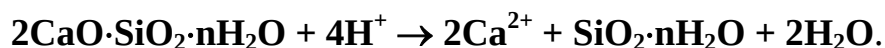
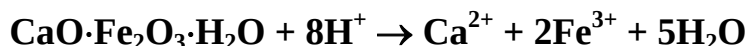
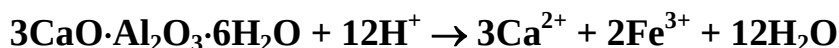
Окисление иона аммония до нитрит-иона:



Окисление нитрит-иона до нитрат-иона:



Таким образом, механизм разрушения цементного камня материала микроорганизмами состоит в том, что различные минеральные и органические кислоты взаимодействуют с основными (щелочными) соединениями цементного камня и разрушают его, превращая гидроалюминаты, гидроферриты и гидросиликаты кальция в соли, не обладающие вяжущими свойствами:



Цементный камень перерождается и теряет прочность, долговечность и другие строительно-механические свойства.

Продукты жизнедеятельности плесневых грибов

Название кислоты	Эмпирическая формула	Виды грибов-продуцентов
Фумаровая	$C_4H_4O_4$	Rhizopus
Янтарная	$C_4H_6O_4$	Fusarium, Rhizopus, нек. Представители родов Aspergillus, Penicillium
Яблочная	$C_4H_6O_5$	Многие культуры грибов
Лимонная	$C_6H_8O_6$	Aspergillus, Penicillium
Глюконовая	$C_6H_{10}O_6$	Aspergillus, Penicillium
Молочная	$C_3H_6O_3$	Rhizopus
Щавелевая	$C_2H_2O_4$	Aspergillus, Fusarium

Выделяемые грибами органические кислоты и уголекислота (совместно с CO_2 воздуха) нейтрализуют бетон. С утратой щелочной реакции жидкая поровая фаза бетона теряет способность поддерживать стальную арматуру в железобетоне в пассивном состоянии. В результате развивается коррозия стальной арматуры в железобетоне.

Следует отметить, что технологическая пыль из органических веществ, осаждающаяся на поверхности бетонных конструкций, создает благоприятные условия для развития грибов и бактерий.

Причины заселения материалов микроорганизмами

Функции микроорганизмов — восстановление нового равновесия на территориях с нарушенным экологическим равновесием, к которым можно отнести городские системы. Пионерные виды дают начало новым формам жизни, а новые формы начинают заполнять экологические ниши. Это патогенные микроорганизмы, одна из функций которых направлена на переработку минеральной составляющей в этой системе. В случае городской системы, они начинают перерабатывать минеральные и органические материалы.

Рассмотрим схему развития экосистемы по стадиям, например, при возведении здания:

1. Экологическое равновесие (пионерная, сукцессионная и климаксная фазы).
2. Нарушение экологического равновесия (сукцессия прерывается на промежуточной стадии, климаксные фазы под угрозой).
3. Экологический кризис (пионерные виды занимают всё экологическое пространство). Вариант третьей стадии может быть идентифицирован и для городских систем.
4. Стабилизация среды (пионерные виды дают начало новым формам).
5. Новое экологическое равновесие (новые формы заполняют экологические ниши).

Вариант третьей стадии, т.е. экологический кризис, может быть идентифицирован и для городских систем. Подобные ситуации стали характерны

для урбанизированных территорий, где природные системы заменены на природно-техногенные. Из-за несоблюдения норм природопользования на таких территориях возникает кризисная ситуация, приводящая к гибели деревьев, заболачиванию водоемов и т.п. Такие ситуации называют критическими из-за приобретения системой свойства «подверженности катастрофам».

Таким образом, естественное экологическое равновесие необратимо нарушается при антропогенном воздействии и переходит в природно-антропогенное равновесие. Это вторичное экологическое равновесие, образующееся на основе баланса измененных человеческой деятельностью средообразующих компонентов и природных процессов. Это равновесие может быть различных уровней – от потенциального восстановления в ходе сукцессии узловых сообществ до устойчивого опустынивания территории.

Территорию крупного города следует рассматривать как экосистему с равновесием природно-антропогенного типа, существующую при постоянном внешнем воздействии человека и интенсивно эксплуатируемую им. Последствием нерационального природопользования стало отсутствие экологического резерва в отдельных муниципальных округах и, отсюда, ограничение на этих территориях нового строительства. На таких территориях строители сталкиваются с экологическими проблемами. Качество строительства напрямую зависит от правильной постановки и решения экологических задач и постоянной оценки воздействий на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла проекта.

Для территории г. Москвы, как показывают наблюдения, все строительные объекты по их ситуационному расположению в городской системе и варианту воздействия на них микробиоты можно разделить на две группы:

I – расположенные вблизи природных сообществ (вариант расположения А на схеме, возможна зона 5);

II – расположенные на территориях, где царствуют пионерные сообщества, т.е. бактерии, грибы и др. микроорганизмы (вариант расположения Б, возможны зоны 1-4).

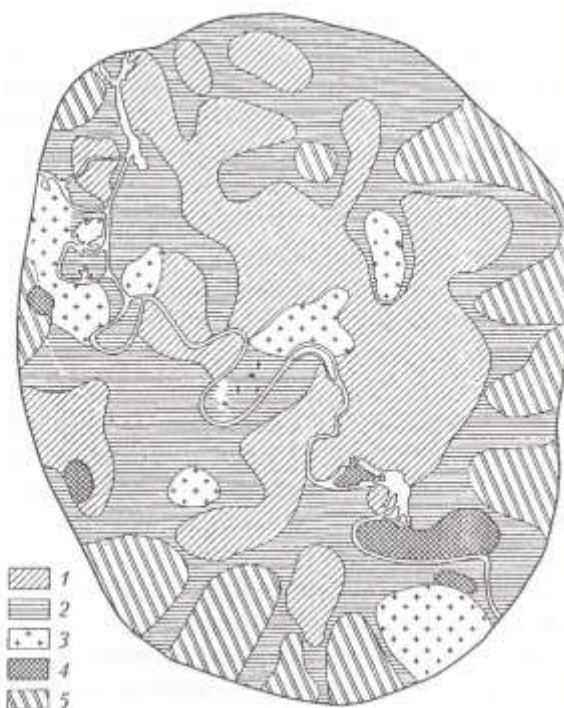
1 зона — развитие гетеротрофной микрофлоры с усилением микробных процессов превращения серы и металлов

2 зона — развитие гетеротрофов с локальным преобладанием процессов превращения соединений серы, азота, образования и окисления метана

3 зона — развитие гетеротрофов с преобладанием микробных процессов превращения азота

4 зона — развитие метанообразующих и метаноокисляющих бактерий

5 зона — сбалансированное развитие микробной системы



В соответствии с этим расположением можно различить два варианта механизма биоповреждений строительного материала.

А — биозаселение объекта направлено на развитие экосистемы. Микроорганизмы действуют сапрофитно, что сопровождается процессом почвообразования и появлением растений, мхов, лишайников и др. на увлажненных участках конструкций.

В случае развития биоповреждений по варианту **А** деструктивные процессы в материале идут с незначительной скоростью, происходит лишь в большей или меньшей степени нарушение эстетических характеристик поверхности материала. При этом для данных процессов приоритетное значение имеют факторы увлажнения, температуры и др.

Опасным в этом случае мероприятием является уничтожение растительности, расположенной в непосредственной близости от строительного объекта. Её уничтожение, как правило, приводит к нарушению экологического равновесия и активизации разрушающих процессов в строительном материале, что будет происходить, пока не установится новое равновесие на этой территории.

Б – когда видимого биозаселения не наблюдается, т.к. в повреждении принимают участие патогенные микроорганизмы, а повреждения материала происходят на межкристаллитном, микроструктурном уровне. В этом случае ситуация подобна кризисной. Микроорганизмы, определяя взаимодействия в системе «материал – среда», занимают все экологическое пространство.

При развитии биоповреждений по варианту **Б** происходит интенсивное химическое загрязнение материала и диффузия в нем растворимых веществ. Появляются высолы, ускоряется процесс выветривания. Новообразования, возникающие в результате воздействия продуктов метаболизма микроорганизмов на материал памятника (прежде всего сульфаты натрия), перемещаются в материале и могут вызвать его разрушение за счет объемных деформаций. При этом такие процессы на ранних стадиях невозможно отследить визуально, что осложняет задачу оценки биоповреждений.

Для идентификации указанных **А** и **Б** вариантов механизма биоповреждений по визуальным признакам и определения характерных проявлений стадий развития этих биоповреждений и прогнозирования тяжести последствий следует различать четыре стадии.

Классификация тяжести биоповреждений

Стадия	Пример	Проявления (характерные признаки)	
		видимые	невидимые
1		Локальные изменения в поверхностном слое (отдельные небольшие очаги пигментации, поверхностные шелушения), площадь повреждений до 10 мм.	Появление в микроструктуре микроводорослей и бактерий. Возможны следы новообразований (0,01-0,09%).
2а		Мокрые пятна, видимая кромка капиллярного увлажнения, зеленый налет, пятна размером не более 2 мм, заселенные сухопутными водорослями или лишайниками темного цвета.	Появление в микроструктуре отдельных бактериальных колоний, возможно наличие единичных гифов грибов.
2б		Появление на фасадных поверхностях налета зеленого и серого цвета, слизистых пленок в местах постоянного увлажнения.	Следы новообразований 0,1-1%.

3а		Заращение лишайниками, мхами. Слегка заметная шероховатость открытых поверхностей. Белые солевые налеты, прочно сцементированные с материалом.	Наличие колоний бактерий, мхов, лишайников. Перекристаллизация CaCO_3 . Кол-во новообразований не более 1%.
3б		Налет от серого до черного цвета. Желто-серые масляно-влажные пятна. Высолы. Вздутия. Интенсивное заращение влажных участков плесневыми грибами и колониями бактерий.	Преобладание на поверхности грибов и гифов внутри камня. Накапливание кристаллогидратов. Преобладания сульфатов натрия, калия и кальция (более 5%).
4а		Отслоения. Локальные выкрашивания в лицевом слое материала. Нарушение связности отделочных материалов. Появление в трещинах растительности.	Продукты перекристаллизации CaCO_3 . Соединения магния и железа.
4б		Растрескивание, отслоение штукатурных слоев. Скалывание, расслоение конструктивных материалов. Полное разрушение связующего кладочного и шовного растворов. Бурный рост грибов и бактерий.	Необратимые изменения состава цементного камня. Высокое содержание сульфатов (более 15%), продуктов растворения минералов цементного камня. Частое присутствие хлорида натрия.

Исследования, предваряющие оценку и диагностику биоповреждений, должны проводиться по трем основным направлениям:

1. Определение состояния окружающей среды (идентификация вариантов **А** или **Б**).
2. Установление характера биоповреждений – имеет место нарушение эстетических характеристик или разрушение материала строительного объекта при его заселении микроорганизмами.
3. Определение стадии биоповреждения.

Все три направления тесно связаны друг с другом, а их комплексный учет позволяет сделать объективные выводы о причине, виде повреждений и механизме коррозионных процессов наблюдаемого объекта.

Алгоритм оценки повреждений должен включать:

1. Диагностику биоповреждений.

2. Управление риском биоповреждений на ранних стадиях с учетом экологических факторов среды эксплуатации и прогнозирование опасности уже имеющихся повреждений (по степени загрязнения и деструкции материала, устойчивости колоний микроорганизмов и экологических факторов, влияющих на заселение материала и рост колонии в случае наличия в материале веществ-загрязнителей, которые являются для них питательным субстратом).
3. Определение варианта и целесообразности применения биоцидной обработки с учетом стадии биоповреждения материала строительного объекта.
4. Выбор средств защиты по экологическим критериям качества.

Рассмотренные методические подходы к прогнозированию и оценке повреждений бетонных конструкций позволяют осуществить оптимизацию предпроектных исследований как по времени, так и по затратам, повысить объективность оценки причин биоповреждений и выбрать эффективную систему защиты бетонных конструкций от повреждений на территориях с нарушенным экологическим равновесием.

Таким образом, можно утверждать, что бетонные конструкции, как объекты городской среды подвержены биохимическому механизму коррозии. Ранее предъявляемые требования к стойкости этих материалов практически не учитывают новых условий эксплуатации и не гарантируют их надежность. Нужны новые экологические требования к строительству и возведению зданий, новые методы диагностики и прогнозирования биоповреждений, учитывающие экологические факторы.