

Обратимость микробиологически индуцированной коррозии под воздействием изменения условий окружающей среды

В.Б.Родин¹, С.К.Жиглецова¹, Н.А.Акимова¹, В.П.Холоденко²

¹ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Роспотребнадзора, Оболенск, Российская Федерация;

²ФГБОУ ВО «Пушинский государственный естественно-научный институт», Пушкино, Российская Федерация

Исследована динамика коррозионных потерь мягкой стали, вызываемых биопленкой естественной микробной ассоциации при изменении условий культивирования. При формировании биопленки на глюкозо-минеральной среде коррозионные потери возрастали, а после перенесения стальных купонов с этой биопленкой в среду LB коррозионные потери уменьшались. В то же время при формировании биопленки на среде LB коррозионные потери относительно контроля были меньше, а после перенесения стальных купонов с этой биопленкой в глюкозо-минеральную среду они становились больше. При интенсивной аэрации наблюдался высокий уровень коррозионных потерь стальных купонов с биопленкой. Однако при смене режима аэрации на микроаэрофильный коррозионные потери резко падали. Полученные данные свидетельствуют, что совокупный метаболизм природной микробной ассоциации способен гибко реагировать на изменения условий культивирования, что приводит к ускорению или торможению коррозионных процессов. Это ставит под сомнение правильность общепринятого разделения микроорганизмов на деструкторы, ускоряющие коррозию, и пассиваторы, замедляющие ее.

Обсуждаются перспективы практического применения обнаруженных закономерностей микробиологически индуцированной коррозии при изменении условий окружающей среды для разработки новых экологически безопасных методов борьбы с коррозией металлов.

Ключевые слова: микробиологически индуцированная коррозия, биопленка, микробная ассоциация, деструкторы, ингибиторы

Для цитирования: Родин В.Б., Жиглецова С.К., Акимова Н.А., Холоденко В.П. Обратимость микробиологически индуцированной коррозии под воздействием изменения условий окружающей среды. Бактериология. 2017; 2(1): 66–72. DOI: 10.20953/2500-1027-2017-1-66-72

The reversibility of microbiologically induced corrosion under the influence of the change of environmental conditions

V.B.Rodin¹, S.K.Zhigletsova¹, N.A.Akimova¹, V.P.Kholodenko²

¹State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology, Rosпотребнадзор, Obolensk, Moscow Region, Russian Federation;

²Pushchino State Natural Science Institute, Pushino, Moscow Region, Russian Federation

The dynamics of the loss of mild steel corrosion caused by natural microbial biofilm association has been investigated under the change of culture conditions. Corrosion losses increased when the biofilm formed in glucose mineral medium, and corrosion losses decreased when the steel coupons with this biofilm have been transferred in LB medium. At the same time, corrosion losses were relatively smaller than in control when the biofilm formed in LB medium, and they became greater than after steel coupons with this biofilms have been transferred into glucose-mineral medium. A high level of corrosion losses of steel coupons observed with biofilms under intensive aeration. However, corrosion losses sharply decreased in microaerophilic conditions. The findings suggest that the overall metabolism of natural microbial consortium is able to respond flexibly to changes in culture conditions, which leads to an acceleration or deceleration of corrosion processes. This casts doubt on the correctness of the conventional subdivision of microorganisms on destructors which accelerate corrosion and inhibitors which slow it.

The prospects of practical application of the data obtained to develop new environmentally sound methods of controlling corrosion of metals are discussed.

Keywords: microbiologically induced corrosion (MIC), biofilm, microbial consortium, destructors, inhibitors

For citation: Rodin V.B., Zhigletsova S.K., Akimova N.A., Kholodenko V.P. The reversibility of microbiologically induced corrosion under the influence of the change of environmental conditions. Bacteriology. 2017; 2(1): 66–72. (In Russian). DOI: 10.20953/2500-1027-2017-1-66-72

Для корреспонденции:

Жиглецова Светлана Константиновна, к.х.н., старший научный сотрудник
ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии
и биотехнологии» Роспотребнадзора

Адрес: 1432279 Оболенск, Московская область,
Серпуховской р-н, ГНЦПМБ
Телефон: (4967) 36-0000; (4967) 36-0010
E-mail: zhigletsova@obolensk.org

Статья поступила 28.11.2016 г., принята к печати 15.03.2017 г.

For correspondence:

Svetlana K. Zhigletsova, PhD, senior researcher, State Research Center
for Applied Microbiology and Biotechnology

Address: SRCAMB 142279 Obolensk, Serpukhov district, Moscow
region, Russian Federation
Phone: (4967) 36-0000; (4967) 36-0010
E-mail: zhigletsova@obolensk.org

The article was received 28.11.2016, accepted for publication 15.03.2017

Микробиологически индуцированная коррозия (МИК) разрушает сталь наряду с электрохимической и химической коррозией [1, 2]. Обычно с МИК борются при помощи биоцидов. В то же время известно, что в ряде случаев коррозия металлов уменьшалась и в присутствии микроорганизмов [3–5]. В результате в литературе получило широкое распространение разделение микроорганизмов на индуцирующих коррозию и защищающих от нее (деструкторы и пассиваторы соответственно).

подавляющее большинство исследований МИК проводилось в лабораторных условиях, далеких от естественных условий окружающей среды, с использованием искусственных питательных сред. Это обусловило необходимость изучения влияния различных факторов внешней среды на закономерности протекания биокоррозионных процессов. Проведенные нами в этой связи исследования показали, что независимо от видовой принадлежности микроорганизма процессы активации или ингибирования коррозии зависели от состава питательной среды [6–9]. Если питательный субстрат способствовал образованию кислых продуктов метаболизма, микроорганизм ускорял коррозию, но если потребление питательного субстрата сопровождалось выделением щелочных продуктов метаболизма, то тот же самый микроорганизм ее замедлял. При этом была обнаружена статистически достоверная корреляция между величиной коррозионных потерь и значением pH культуральной жидкости в конце инкубации.

Эти результаты указывают на то, что традиционное разделение микроорганизмов на деструкторы и пассиваторы по меньшей мере спорно. Мы можем только утверждать, что в зависимости от типа питательного субстрата микроорганизмы различаются в своей способности проявления деструктивных или защитных свойств. В последнее время эта точка зрения находит все большее подтверждение [10, 11].

Мы предположили, что это относится не только к исследованным чистым культурам, но и к естественным микробным ассоциациям. В связи с этим нами была исследована коррозионная активность четырех природных микробных ассоциаций, выделенных из различных экологических ниш, при разных условиях их культивирования [12]. Было установлено, что эти ассоциации, так же, как и чистые культуры, одинаковым образом изменяли свое воздействие на коррозионные процессы при смене типа питательного субстрата и режима аэрации, вызывая как увеличение, так и уменьшение коррозионных потерь.

Во всех проведенных нами ранее исследованиях инокуляция планктонных клеток в жидкую среду, колонизация поверхности металла, формирование и развитие биопленки происходили за достаточно короткое время и без целенаправленного изменения экспериментатором условий окружающей среды. Однако в природных условиях биопленки обычно формируются длительное время, в течение которого могут происходить резкие смены условий аэрации и состава питательного субстрата.

Целью данной работы являлась оценка воздействия смены типа питательного субстрата и режима аэрации на коррозионные процессы в присутствии зрелых сформировавшихся биопленок природных микробных ассоциаций.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась природная микробная ассоциация «Стоки», выделенная из нефтепромысловых вод Альметьевского месторождения (Татарстан). Ее основными компонентами являлись сульфатовосстанавливающие бактерии и аэробные гетеротрофные микроорганизмы.

В работе использовали следующие питательные среды: среда Лурия-Бертани (LB), глюкозо-минеральная среда с пептоном (ГМП), DSM – среда для выращивания сульфатовосстанавливающих бактерий (СВБ), приготовленная на водопроводной воде среда, содержащая минеральные соли и керосин как единственный источник углерода и энергии (МСК). Составы питательных сред приведены в [12].

После определенной экспозиции биопленку смывали со стальных купонов физиологическим раствором с помощью кисточки, гомогенизировали и определяли в смыве количество жизнеспособных аэробных гетеротрофов путем высева на чашки Петри с мясопептонным агаром. Определение концентрации СВБ осуществляли в среде DSM методом предельных разведений по продукту жизнедеятельности этих бактерий – сульфиду железа, дающему черный осадок.

Определение в культуральной жидкости концентрации ионов фосфата, сульфата, аммония и сероводорода проводили по стандартным методикам [13].

Культивирование на средах ГМП и LB проводили в микроаэрофильных условиях в пробирках с 10 мл среды, закрытых ватными пробками, в стационарном режиме. В этом случае стерильные контрольные и инокулированные микробной ассоциацией среды разливали в пробирки с купонами, закрывали ватными пробками и инкубировали при 28°C. Во время инкубации 1–2 раза в неделю отбирали культуральную жидкость (КЖ) и пять купонов для проведения химического и микробиологического анализа. Биопленку с поверхности 5 купонов смывали 10 мл физиологического раствора и проводили микробиологический анализ полученного смыва. После этого определяли коррозионные весовые потери в соответствии с методикой, изложенной в [13]. Через месяц инкубации из части пробирок со средой ГМП выливали КЖ и заполняли свежей средой LB. Одновременно с этим из части пробирок со средой LB выливали КЖ и заполняли свежей средой ГМП. После этого продолжали регулярный отбор купонов и КЖ для микробиологического и химического анализа.

На среде МСК использовали следующие варианты культивирования.

- Анаэробный: инкубация в конических колбах на 700 мл, закрытых ватными пробками с 700 мл среды в стационарном режиме. При этом площадь контакта среды с кислородом воздуха была минимальной. Весь поступающий кислород поглощался биопленкой аэробных нефтеокисляющих микроорганизмов, вырастающей под слоем керосина.

- Микроаэрофильный: инкубация в конических колбах на 700 мл, закрытых ватными пробками, с 200 мл среды в стационарном режиме. В данном случае отношение площади контакта среды с воздухом к объему среды гораздо больше по сравнению с предыдущим вариантом. Поэтому биопленка аэробных нефтеокисляющих микроорганизмов не полностью поглощала кислород, поступающий в питательную среду.

- Аэробный барботажный: инкубация в химическом стакане объемом 2 л с 1500 мл среды с барботажем воздухом.
- Аэробный на качалке: в конических колбах объемом 700 мл, с 200 мл среды, помещенных на качалку при 200 об/мин.

В наших экспериментальных условиях термины «анаэробный» и «микроаэрофильный» являются достаточно условными. Вводя их, мы имели в виду только то, что один из них в большей степени способствует созданию в процессе инкубации анаэробных, а другой – микроаэрофильных условий.

В опытах использовали обработанные 70%-ным этанолом подложки из полиэтилена размером 10 × 60 мм, в которых закрепляли диски из мягкой стали (купоны). Инокулированную и контрольную среду инкубировали при 28°C. Во время инкубации 1–2 раза в неделю вынимали подложку с купонами, определяли весовые потери купонов и производили отбор КЖ для проведения химического и микробиологического анализов.

При анаэробном и микроаэрофильном культивировании подложки с купонами помещали на дно колб, а при аэробном культивировании подвешивали на расстоянии 1 см от дна. В качестве контрольной среды использовали стерильную среду МСК без керосина. При аэробном и микроаэрофильном культивировании 1 раз в неделю в сосуды с микроорганизмами вносили свежую порцию керосина. При анаэробном культивировании аналогичную процедуру проводили 1 раз в 2 недели.

В опытах со сменой режима аэрации часть купонов с биопленками, выросшими в течение 2 недель при аэробном режиме культивирования, переносили в колбу с микроаэрофильными условиями, продолжая в дальнейшем регулярный отбор проб и купонов из сосудов с аэробными и микроаэрофильными режимами аэрации.

При определении коэффициента *k*, необходимого для расчета коррозионных потерь в стерильной среде МСК, анаэробный и микроаэрофильный режимы обеспечивали следующим образом:

- анаэробный: культивирование проводили в пробирках с завинчивающимися пластмассовыми пробками (Pirax®), полностью заполненных средой МСК;

- микроаэрофильный: культивирование проводили в микробиологических пробирках, содержащих 10 мл среды, закрытых ватными пробками.

Результаты и обсуждение

Результаты микробиологического анализа показали, что во всех опытных вариантах на средах ГМП и LB уже через 7 дней инкубации численность как планктонных, так и входящих в состав биопленок гетеротрофных микроорганизмов достигала высоких значений (10^7 – 10^8 КОЕ/мл (см^2)) и оставалась неизменной в течение всего эксперимента.

В присутствии микробной ассоциации на среде LB происходило защелачивание среды до pH 8,0–8,5 и сильное (в 40 раз относительно стерильного контроля) ингибирование коррозии. При переносе купонов с биопленкой, выросшей на среде LB, в среду ГМП коррозионные потери возрастали, и их скорость становилась в 7 раз больше, чем в стерильной среде ГМП (рис. 1а).

В присутствии микробной ассоциации на среде ГМП наблюдалось слабое, до pH 6,7, закисление среды и увеличение коррозионных потерь по сравнению со стерильным контролем примерно в 4 раза. При переносе купонов с биопленкой, выросшей на среде ГМП, в среду LB скорость коррозии уменьшалась до значений, характерных для инокулированной среды LB (рис. 1б).

При постановке опытов по определению динамики коррозионных потерь на среде МСК оказалось невозможным сохранение стерильности в контроле, особенно при аэробном способе культивирования. Для решения этой проблемы было предложено использовать в качестве контроля среду МСК без керосина. Предполагалось, что в такой среде, лишенной источника углерода и энергии, микроорганизмы не будут развиваться. В то же время отсутствие керосина не должно было существенно сказаться на скорости коррозии, поскольку растворимость его в воде очень мала.

Для проверки этого предположения нами были поставлены опыты по оценке влияния отсутствия керосина на корро-

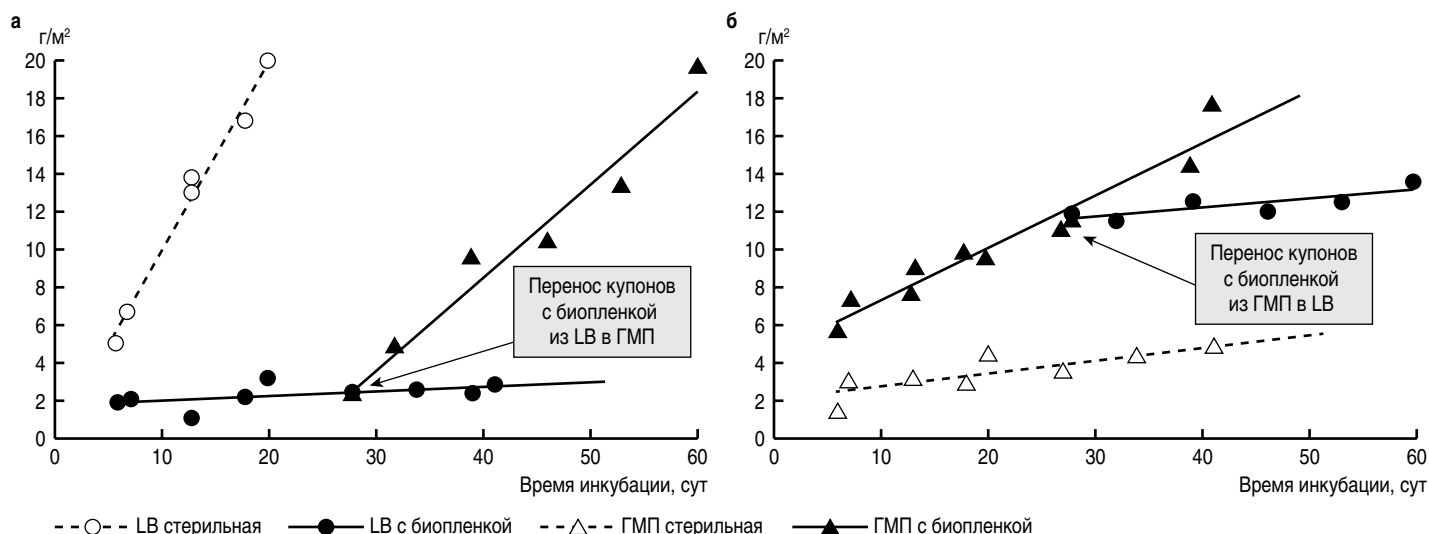


Рис. 1. Динамика коррозионных потерь под биопленкой природной микробной ассоциации при смене питательного субстрата: а – биопленка, выросшая на среде ГМП, переносилась на среду LB; б – биопленка, выросшая на среде LB, переносилась на среду ГМП.

Таблица. Определение коэффициента k , необходимого для расчета коррозионных потерь в стерильной среде МСК

Время инкубации, сут	Анаэробные условия				Микроаэрофильные условия			
	Коррозионные потери, г/м ² с керосином (+K)	Коррозионные потери, г/м ² без керосина (-K)	Отдельные значения	$k = (+K)/(-K)$ среднее	Коррозионные потери, г/м ² с керосином (+K)	Коррозионные потери, г/м ² без керосина (-K)	Отдельные значения	$k = (+K)/(-K)$ среднее
7	3,69	3,57	1,04	0,77 ± 0,16	6,11	6,62	0,92	0,79 ± 0,10
15	7,13	9,17	0,78		14,27	17,32	0,82	
22	7,64	12,10	0,63		19,62	25,61	0,77	
36	18,47	25,48	0,73		35,67	56,69	0,63	
42	12,74	14,78	0,86		56,05	70,96	0,79	
49	12,36	20,64	0,60		57,20	73,50	0,78	

зионные потери в стерильной среде МСК. Опыты проводили в микроаэрофильных и анаэробных условиях.

Как видно из результатов, представленных в таблице, независимо от интенсивности аэрации скорость коррозии на среде с керосином оказалась примерно на 20% меньше, чем без него. Полученный результат позволил определить значение коэффициента пересчета $k = 0,78$, благодаря которому стало возможным рассчитывать коррозионные потери в стерильной среде МСК по формуле:

$$(+K) = 0,78 \times (-K),$$

где $(+K)$ – коррозионные потери на среде с керосином, $(-K)$ – коррозионные потери на среде без керосина.

В процессе инкубации микробной ассоциации на среде МСК наблюдалась интенсивная утилизация керосина. Результаты микробиологического анализа показали, что независимо от режима аэрации во всех опытных вариантах уже через 7–15 дней инкубации численность планктонных и входящих в состав биопленки микроорганизмов достигала высоких значений (аэробных гетеротрофов – 10^7 – 10^8 КОЕ/мл (см²), СВБ – 10^6 – 10^8 бактерий /мл (см²)), которые оставались неизменными в течение всего эксперимента.

Во всех вариантах культивирования в среде МСК на протяжении всего периода инкубации концентрации ионов сульфата и аммония мало отличались от исходных значений. В то же время концентрация фосфатов как в стерильной, так и в инокулированных средах уже через неделю культивирования уменьшалась на два порядка, а в последующем определялась на уровне следовых значений. Это было вызвано тем, что ионы кальция и магния, которые присутствовали во входящей в состав среды МСК водопроводной воде, образовывали с фосфат-ионами белый осадок, который скапливался на дне сосудов и на поверхности купонов.

В анаэробных и микроаэрофильных условиях, начиная с 10–15 дней инкубации, наблюдалось почернение среды. При этом концентрация сероводорода в культуральной жидкости как в микроаэрофильных, так и в анаэробных условиях была примерно одинакова и не превышала 10 мг/л.

Во всех вариантах культивирования в стерильной среде МСК наблюдалось защелачивание среды. В присутствии микробной ассоциации в микроаэрофильных условиях и при аэрации на качалке наблюдалось сильное закисление культуральной жидкости. В то же время в анаэробных условиях и при аэробном барботаже на протяжении всего периода инкубации значения pH колебались вблизи нейтральных значений.

В присутствии микробной ассоциации в стационарных микроаэрофильных и анаэробных условиях на среде МСК

наблюдалось одинаково сильное ингибирование коррозии относительно стерильной среды (рис. 2).

При аэрации на качалке в стерильной среде имели место очень высокие коррозионные потери, однако в присутствии микробной ассоциации они уменьшались примерно в два раза, а при переносе купонов с биопленкой в микроаэрофильные условия практически полностью прекращались (рис. 3а).

В отличие от этого, при аэробном барботаже коррозионные потери в присутствии микроорганизмов были приблизительно в 2 раза выше, чем в стерильной среде. Последние, в свою очередь, были на порядок меньше коррозионных потерь в стерильной среде при аэрации на качалке. Как и в предыдущем случае, перенос купонов с биопленкой в микроаэрофильные условия приводил к практически полной остановке коррозии (рис. 3б).

В целом полученные результаты подтвердили наше предположение об определяющем значении условий окружающей среды на характер и направление микробиологического воздействия на коррозионные процессы зрелых биопленок естественных микробных ассоциаций. При этом обнаруженные в этой работе особенности МИК, так же, как и в случае чистых культур и «молодых» биопленок, по-прежнему могут быть объяснены на основе закономерностей электрохимической коррозии.

Так, биопленка, ранее ингибирующая коррозию на среде LB, после переноса на среду ГМП начинала ускорять коррозию, а биопленка, ранее ускорявшая коррозию на

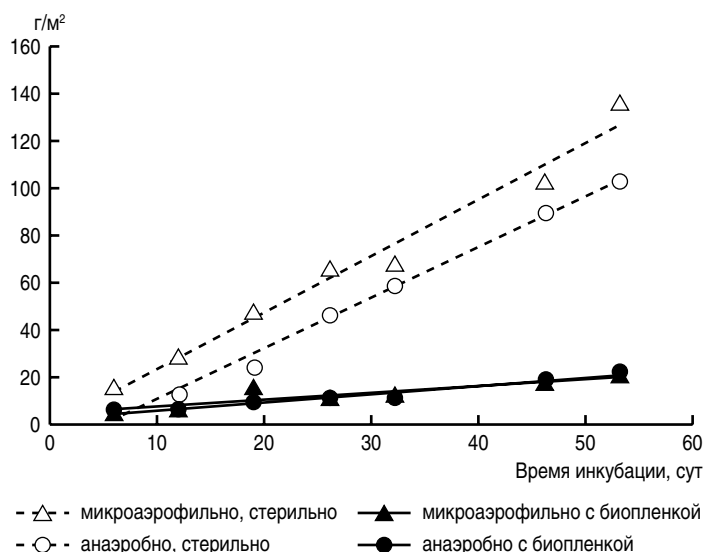


Рис. 2. Динамика коррозионных потерь на среде МСК в стационарных условиях при разных режимах аэрации.

среде ГМП, после переноса на среду LB начинала ингибировать коррозию (рис. 1). В данном случае ключевым фактором, определяющим направление биокоррозионного процесса, была способность микроорганизмов выделять либо кислые, либо щелочные продукты метаболизма. Кроме этого, на среде ГМП микробиологически индуцированное ускорение коррозии происходило, по-видимому, за счет устранения микробами пассивирующего эффекта фосфатной пленки.

В свою очередь, на среде МСК коррозионные потери, по всей видимости, зависели от концентрации кислорода и сероводорода под биопленкой. В микроаэрофильных и анаэробных условиях из-за поглощения биопленкой кислорода коррозионные потери были существенно меньше по сравнению со стерильным контролем (рис. 2). Именно поэтому при переносе купонов со сформировавшейся в аэробных условиях биопленкой в микроаэрофильные условия она практически полностью ингибировала коррозию (рис. 3).

Однако в результатах, полученных на среде МСК, есть и отличия от ранее опубликованных данных. В прошлой серии экспериментов [12] мы вносили керосин в инокулированную среду лишь однажды в начале эксперимента. При этом отмечалось только слабое закисление среды при культивировании на качалке и в стационарных микроаэрофильных условиях. В настоящей работе в течение инкубации мы вносили керосин еженедельно. Видимо, из-за этого при интенсивном аэробном, а также микроаэрофильном способе культивирования произошло сильное закисление среды, вызванное биodeградацией большого количества керосина. В то же время при барботажной аэрации и при анаэробном способе культивирования сильного закисления культуральной жидкости не происходило. Причина этого и в том, и другом случае, по-видимому, заключалась в разной величине отношения площади контакта биопленки с керосином (S) к объему (V) культуральной жидкости, поскольку площадь контакта определяет количество продуктов метаболизма керосина (в данном случае – жирных кислот), а объем среды – их концентрацию. Так, наибольшую площадь контакта обеспечивало культивирование на качалке, поскольку

при этом керосин находился в эмульгированном состоянии. Далее следуют микроаэрофильные условия ($S/V = 0,13 \text{ м}^2/\text{л}$), затем культивирование с барботажом ($S/V = 0,03 \text{ м}^2/\text{л}$, при этом керосин не эмульгировался, а только покрывал поверхность культуральной жидкости в сосуде) и анаэробные условия ($S/V = 0,007 \text{ м}^2/\text{л}$).

На первый взгляд, сильное закисление среды МСК не согласуется с фактом ингибирования коррозии при аэрации на качалке и в микроаэрофильных условиях. Ведь столь сильное закисление культуральной жидкости должно было вызвать не замедление, а ускорение коррозии, так, как это происходило в среде ГМП [6, 7]. Однако, если в среде ГМП определяемый питательным субстратом метаболизм находящихся в культуральном сосуде клеток одинаков, то на среде МСК ситуация совершенно иная. В условиях наших экспериментов на среде МСК образовывалось два вида биопленок, которые, прежде всего, отличались по типу используемого питательного субстрата. Первая – это биопленка нефтеокисляющих микроорганизмов, которая развивалась на границе раздела фаз керосин/вода. Она осуществляла аэробное окисление керосина и переводила углеводороды в растворимые в воде жирные кислоты. Их накопление приводило к закислению культуральной жидкости. Вторая – это биопленка, которая образуется на поверхности металлических купонов. Она развивалась, используя в качестве питательного субстрата растворенные в воде продукты биodeградации керосина. Утилизируя растворенные в воде жирные кислоты, эта биопленка нейтрализовывала кислую реакцию среды в прилегающей к поверхности металла водной фазе. С другой стороны, почернение биопленки из-за накопления в ней сульфида железа, появление сероводорода в культуральной жидкости, а также результаты микробиологического анализа смывов с поверхности купонов свидетельствовали об активности входящих в состав биопленки сульфатвосстанавливающих бактерий. Обычно их относят к коррозионно опасной группе микроорганизмов, однако роль их в коррозионных процессах далеко не однозначна. Хорошо известно, что восстановление СВБ сульфата до сульфида приводит к защелачиванию среды. Также установлено, что

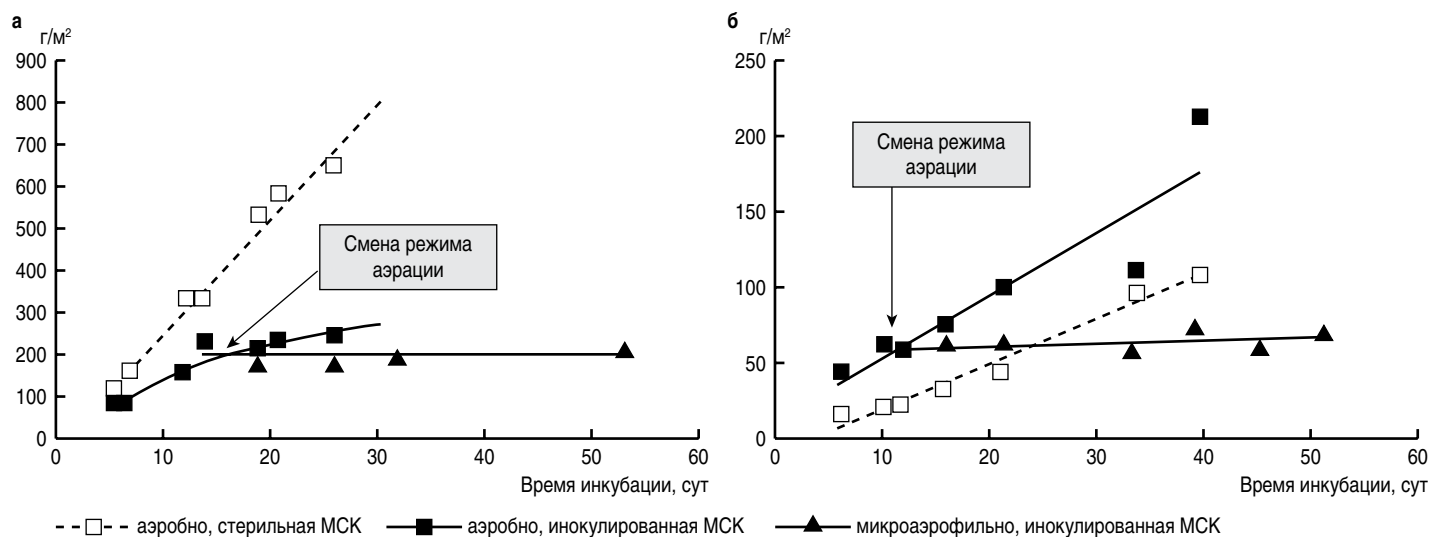


Рис. 3. Динамика коррозионных потерь на среде МСК при смене режима аэрации: а – аэробный на качалке; б – аэробный барботажный.

образующаяся в результате деятельности СВБ пленка из сульфида железа ингибирует коррозию [14]. Таким образом, защитный эффект биопленки, образующейся при интенсивной аэрации на качалке и в микроаэрофильных условиях, помимо поглощения ею кислорода, можно объяснить нейтрализацией жирных кислот и защелачиванием прилегающей к поверхности металла водной фазы.

Вторым следствием периодического еженедельного введения керосина в опытах со средой МСК, очевидно, было ингибирование коррозии микроорганизмами в условиях интенсивной аэрации на качалке (рис. 3а), в то время как при однократном введении его в начале эксперимента не было отмечено существенного влияния микроорганизмов на коррозию [6]. Однократное введение керосина, по-видимому, не обеспечивало биопленку достаточным для выполнения защитной функции запасом питательных веществ.

Наиболее интересный, на наш взгляд, результат был получен в опыте со сменой режима аэрации с аэробного барботажного на микроаэрофильный (рис. 3б). По сравнению с режимом аэрации на качалке (рис. 3а), скорость коррозии при аэробном барботаже в стерильной среде упала на порядок, очевидно, не только за счет уменьшения интенсивности аэрации, но и за счет образования осадков фосфатов, создавших дополнительный барьер, препятствовавший доступу кислорода к поверхности металла. В то же время скорость коррозии в присутствии микроорганизмов при уменьшении интенсивности аэрации снизилась примерно в 3 раза по сравнению с аэрацией на качалке. Возможно, это связано с тем, что при формировании биопленки одновременно с осаждением неорганических отложений, что и происходило в данном случае, образовывалась структура более рыхлая, чем в случае только неорганических осадков в стерильной среде. Таким образом, формирование неорганических осадков привело к тому, что при уменьшении интенсивности аэрации скорость коррозии в присутствии микроорганизмов оказалась выше, чем в стерильной среде. Тем не менее, дальнейшее снижение интенсивности аэрации до микроаэрофильного режима привело к практически полной остановке коррозионных процессов в присутствии микроорганизмов.

В реальных условиях образование биопленки обычно идет одновременно с образованием большого количества различных неорганических отложений, из-за чего ее иногда даже трудно обнаружить [2]. Полученный результат показывает, что образование неорганических осадков может оказывать существенное влияние на коррозионное воздействие микроорганизмов. Однако даже в этом случае резкая смена режима аэрации может привести к переходу от разрушающего воздействия биопленки к защитному эффекту.

Таким образом, данная работа подтвердила сделанное ранее заключение о спорности определяющего значения для МИК разделения микроорганизмов на деструкторы и пассиваторы. Полученные результаты показали, что совокупный метаболизм природных микробных ассоциаций способен гибко реагировать на изменения условий окружающей среды, ускоряя или замедляя коррозионные процессы. Эти закономерности могут быть положены в основу новых, экологически безопасных методов борьбы с коррозией, которые, в общих чертах, представляются нам следующим образом.

Работу следует начинать с модельных экспериментов. Если их результаты в совокупности с данными микробиологического и химического анализа технологической системы будут свидетельствовать о наличии в ней биокоррозионных процессов, то, прежде всего, необходимо визуально и по данным микробиологического анализа определить возраст и активность биопленки.

В том случае, если биопленка только формируется и активна, то бороться с ней можно при помощи имеющихся на рынке биоцидов. Если же в технологической системе присутствует зрелая и мощная биопленка, использование биоцидов становится малоэффективным, и поэтому предпочтение должно отдаваться биологическим методам борьбы. Эти методы должны разрабатываться с учетом следующих положений.

1. Максимальный защитный эффект от МИК биологическим способом возможен только при наличии микроаэрофильных или анаэробных условий. В аэробных условиях биозащита возможна только при наличии на металлических поверхностях объемных биообращаний, внутри которых создаются микроаэрофильные или анаэробные условия.

2. Биозащитный эффект возникает как за счет поглощения биопленками кислорода, так и в результате продуцирования ими щелочных продуктов метаболизма. В соответствии с этим биозащитный эффект может возникать после введения в технологические воды пептонов или других азотсодержащих органических веществ, при ферментации которых выделяются щелочные продукты метаболизма, а также минеральных солей (нитратов, аммония, фосфатов), способствующих ускорению роста микроорганизмов и, соответственно, усилению потребления ими кислорода. В то же время необходимо иметь в виду, что это может привести к ускорению нежелательных процессов биообращения. Поэтому этот метод будет эффективен только в том случае, если вводимые вещества будут добавляться в оптимальных количествах, которые, с одной стороны, будут достаточны для того, чтобы обеспечить биозащитный эффект, а с другой, окажутся недостаточными для усиления биообращения. В связи с этим оптимальные дозы и режимы подачи вводимых веществ должны быть предварительно определены по результатам отдельных модельных экспериментов.

3. Усиление микроорганизмами коррозии имеет место при продуцировании ими таких коррозионно-агрессивных веществ, как сероводород и кислоты. В соответствии с этим для предотвращения усиления МИК в технологические воды не должны попадать такие кислотообразующие продукты, как углеводы и углеводороды, а также сульфаты и сульфиды, которые используются СВБ с образованием коррозионно-агрессивного сероводорода.

Таким образом, в целом полученные результаты открывают широкое поле деятельности не только для изучения, но и управления коррозионными процессами в реальных условиях эксплуатации промышленного оборудования.

Исследование выполнено в рамках Отраслевой программы Роспотребнадзора «Разработка способов профилактики техногенных аварий, вызываемых биокоррозией технологического оборудования, для повышения биобезопасности микробиологических исследований» (на 2006–2010 гг.).

Литература

- Videla HA. Manual of Biocorrosion. N.-Y.: CRC Press Inc., 1996, 273 p.
- Borenshtein SW. Microbiologically influenced corrosion handbook. N.-Y.: Industrial Press Inc., 1994, 208 p.
- Pedersen A, Hermansson M. The effects on metal corrosion by *Serratia marcescens* and a *Pseudomonas* sp S9. *Biofouling*. 1989;1:313-22.
- Jayaraman A, Eartman JC, Wood TK. Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1997;47(1):62-8.
- Potekhina JS, Sherisheva NG, Potekhina LP, Pospelov AP, Rakitina TA, Warnecke F, et al. Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1999;52(5):639-46.
- Rodin VB, Jigletsova SK, Kobelev VS, Akimova NA, Aleksandrova NV, Rasulova GE, et al. Development of biological methods for controlling the aerobic microorganism-induced corrosion of carbon steel. *Appl Biochem Microbiol*. 2000;36(6):589-93.
- Jigletsova SK, Rodin VB, Kobelev VS, Aleksandrova NV, Rasulova GE, Kholodenko VP. Studies of initial stages of biocorrosion of steel. *Appl Biochem Microbiol*. 2000;36(6):550-4.
- Jigletsova SK, Rodin VB, Kobelev VS, Akimova NA, Aleksandrova NV, Rasulova GE, et al. Use of biocides as agents against microorganism-induced corrosion increases ecological safety. *Appl Biochem Microbiol*. 2000;36(6):602-8.
- Rodin VB, Jigletsova SK, Akimova NA, Kholodenko VP. Direct quantitative evaluation of the effects of biocides on *pseudomonas fluorescens* in various nutrient media. *Appl Biochem Microbiol*. 2000;36(6):609-12.
- Javed MA, Stoddart PR, McArthur SL, Wade SA, Palombo EA. Inhibition or acceleration: bacterial test media can determine the course of microbiologically influenced corrosion. *Corr Sci*. 2014;86:149-58.
- Valencia-Cantero E, Peña-Cabrales JJ. Effects of iron-reducing bacteria on carbon steel corrosion induced by thermophilic sulfate-reducing consortia. *J Microbiol Biotechnol*. 2014;24(2):280-6.
- Rodin VB, Zhigletsova SK, Zhirkova NA, Aleksandrova NV, Chugunov VA, Kholodenko VP. Corrosive activity of natural microbial associations at various conditions of cultivation. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2011;47(6):615-620.
- Laitinen GA, Kharris VE. *Khimicheskii analiz* [Chemical analysis]. Moscow: "Khimiya" Publ., 1979, 624 p. (In Russian).
- King RA, Miller JDA. Corrosion by the sulphate-reducing bacteria. *Nature*. 1971;233:491-2.

Информация об авторах:

Родин Владимир Борисович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Роспотребнадзора
 Адрес: 1432279, Оболенск, Московская область, Серпуховской р-н, ГНЦПМБ
 Телефон: (4967) 36-0000; (4967) 36-0010
 E-mail: info@obolensk.org

Акимова Наталья Александровна, ведущий инженер-микробиолог сектора разработки диагностических препаратов ФБУН «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Роспотребнадзора
 Адрес: 1432279, Оболенск, Московская область, Серпуховской р-н, ГНЦПМБ
 Телефон: (4967) 31-1983
 E-mail: Ana101@mail.ru

Холоденко Василий Петрович, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пушинский государственный естественно-научный институт»
 Адрес: 142290, Пушино, пр. Науки, 3
 Телефон: (4967) 73-18-57
 E-mail: kholodenko_srcam@mail.ru

References

- Videla HA. Manual of Biocorrosion. N.-Y.: CRC Press Inc., 1996, 273 p.
- Borenshtein SW. Microbiologically influenced corrosion handbook. N.-Y.: Industrial Press Inc., 1994, 208 p.
- Pedersen A, Hermansson M. The effects on metal corrosion by *Serratia marcescens* and a *Pseudomonas* sp S9. *Biofouling*. 1989;1:313-22.
- Jayaraman A, Eartman JC, Wood TK. Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1997;47(1):62-8.
- Potekhina JS, Sherisheva NG, Potekhina LP, Pospelov AP, Rakitina TA, Warnecke F, et al. Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1999;52(5):639-46.
- Rodin VB, Jigletsova SK, Kobelev VS, Akimova NA, Aleksandrova NV, Rasulova GE, et al. Development of biological methods for controlling the aerobic

Information about authors:

Vladimir B. Rodin, senior researcher, PhD, State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology
 Address: SRCAMB 142279 Obolensk, Serpukhov district, Moscow region, Russian Federation
 Phone: (4967) 36-0000; (4967) 36-0010
 E-mail: info@obolensk.org

Natalia A. Akimova, leading engineer-microbiologist sector development of diagnostic products, State Research Center for Applied Microbiology and Biotechnology
 Address: SRCAMB 142279 Obolensk, Serpukhov district, Moscow region, Russian Federation
 Phone: (4967) 31-1938
 E-mail: Ana101@mail.ru

Vasily P. Kholodenko, Sc.D., professor Pushchino State Natural Science Institute
 Address: 3, pr. Nauki, Pushchino, 142290, Russian Federation
 Phone: (4967) 73-18-57
 E-mail: kholodenko_srcam@mail.ru