

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА АКТИВНОСТЬ ПРИКРЕПЛЁННЫХ СУЛЬФАТВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ БАКТЕРИЙ

© 2021

Нестерова Е.В.¹, Веревкин А.Г.², Прохорова Н.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(г. Самара, Российская Федерация)

²Научно-производственный центр «Самара» (г. Самара, Российская Федерация)

Аннотация. Техногенные аварии, связанные с биологической коррозией трубопроводов и другого нефтепромышленного оборудования, являются острой проблемой во всех нефтедобывающих странах мира. Установлено, что многие виды коррозии инициируются развитием сульфатвосстанавливающих бактерий на внутренних поверхностях труб. В данной статье представлены результаты модельных лабораторных экспериментов по оценке влияния химического состава трубопроводной стали на количество и биохимическую активность сульфатвосстанавливающих бактерий, развивающихся на ее поверхности. Для эксперимента были выбраны хромсодержащие стали марок 13ХФА, 08ХМФА и 15Х5М, в качестве образцов сравнения использовали кремнемарганцовистую сталь марки 17Г1С. Бактерии для модельных экспериментов, большинство которых принадлежало к роду *Desulfovibrio*, отбирали с внутренней поверхности трубы в области ее сквозного повреждения после эксплуатации на нефтяном месторождении Самарской области. В модельных экспериментах было установлено достоверное влияние химического состава трубной стали на количественные характеристики и биохимическую активность бактерий, развивающихся на ее поверхности. Биохимическая активность сульфатвосстанавливающих бактерий, определяемая по стимуляции образования сероводорода и изменению дегидрогеназной активности, достоверно зависела от содержания хрома. Повышение концентрации хрома в испытуемых образцах стали до 5% снижало количество сульфатвосстанавливающих бактерий и их биохимическую активность. Проведенные эксперименты позволяют судить только о влиянии химического состава трубной стали разных марок на количество и биохимическую активность сульфатвосстанавливающих бактерий, но не выявляют ее устойчивости к бактериальной коррозии.

Ключевые слова: сульфатвосстанавливающие бактерии; СВБ; *Desulfovibrio*; адгезия бактерий; биопленка; коррозия нефтепроводных труб; продукты коррозии; сканирующая электронная микроскопия; СЭМ; химический состав стали.

THE INFLUENCE OF CARBON STEEL CHEMICAL COMPOSITION ON THE BIOCHEMICAL ACTIVITY OF SESSILE SULFATE-REDUCING BACTERIA

© 2021

Nesterova E.V.¹, Verevkin A.G.², Prokhorova N.V.¹

¹Samara National Research University (Samara, Russian Federation)

²Research and Production Center «Samara» (Samara, Russian Federation)

Abstract. The technogenic failure caused by biological corrosion of pipelines and other oilfield equipment is an urgent problem for all oil-producing countries of the world. It has been established that many types of corrosion are initiated by the development of sulfate-reducing bacteria on the inner pipe surfaces. This paper presents the results of model laboratory experiments aimed at assessing the effect of the chemical composition of pipeline steel on the number and biochemical activity of sulfate-reducing bacteria development on its surface. Three chromium-containing corrosion-resistant steels were selected for the experiment, steel samples alloyed with 1% manganese were used as control samples. The bacteria for model experiments, mostly belonging to the genus *Desulfovibrio*, were taken from the inner surface of the damaged pipe after exploitation at an oil field in the Samara Region. In model experiments a reliable influence of the chemical composition of pipe steel on the quantitative characteristics and biochemical activity of bacteria developing on its surface was established. The biochemical activity of sulfate-reducing bacteria, determined by the stimulation of hydrogen sulfide formation and a change in dehydrogenase activity, significantly depended on the chromium content. An increase in the chromium concentration in the tested steel samples by up to 5% reduced the number of sulfate-reducing bacteria and their biochemical activity. The experiments allow us only to make a conclusion about the influence of the chemical composition of pipe steels on the number and biochemical activity of sulfate-reducing bacteria, but do not reveal its resistance to bacterial corrosion.

Keywords: sulfate-reducing bacteria; SRB; *Desulfovibrio*; adhesion of bacteria; biofilm; corrosion of oil pipelines; corrosion products; scanning electron microscopy; SEM; chemical steel composition.

Введение

Одной из сложных и актуальных проблем охраны окружающей среды является загрязнение нефтью и нефтепродуктами в результате техногенных аварий. До 90% отказов нефтепромышленных трубопроводов являются следствием коррозионных повреждений, 42% труб не выдерживают пятилетней эксплуатации,

а 17% – даже двухлетней [1, с. 239]. В целом по стране добывающие скважины находятся на падающей и завершающей стадии добычи нефти, при которой наряду с нефтью добывается около 80% пластовой воды [1, с. 158]. В условиях сильного обводнения добываемого продукта основной причиной разрушения углеродистой стали нефтепромышленного

оборудования становится локальная коррозия со стороны внутренней поверхности труб, инициируемая развитием сульфатовосстанавливающих бактерий (СВБ) [2, с. 604–608]. Для изготовления нефтегазопроводных труб традиционно применяются стали с системой легирования Fe-Mn-V, которые обеспечивают требуемый уровень механических характеристик (прочность, хладостойкость и т.д.), но имеют низкую коррозионную устойчивость [3, с. 5]. Одной из эффективных технологий, применяющихся в мировой и отечественной практике защиты трубопроводов от коррозии, является повышение коррозионной стойкости стали введением в ее состав легирующих элементов: хрома, никеля, молибдена и др. [4, с. 6–10]. Известно, что тяжелые металлы, в частности соединения хрома и молибдена, оказывают ингибирующее влияние на процесс сульфатредукции планктонных форм СВБ [5, с. 315–319; 6, с. 323]. Имеются также немногочисленные данные исследований, показавшие влияние микроструктуры стали (формы, размера и состава включений) на коррозию стали в присутствии бактерий [7, с. 24–26; 8; 9, с. 73; 10, с. 1411]. Результаты исследований причин коррозионного разрушения стальных трубопроводов месторождений Самарской области показали, что фактором, осложняющим коррозионный процесс, также является активность СВБ [11, с. 60–61].

Целью данной работы было изучение влияния химического состава стали на активность прикреплённых сульфатовосстанавливающих бактерий, выделенных с внутренней поверхности аварийного участка трубопровода нефтяного месторождения в Самарской области.

Объекты и методы исследований

Накопительная культура сульфатовосстанавливающих бактерий была получена из продуктов коррозии, отобранных с внутренней поверхности трубы в области ее сквозного повреждения после эксплуатации на нефтяном месторождении Самарской области.

СВБ культивировали на среде Постгейта «С» [12, с. 32] в анаэробных условиях, создаваемых пропуском через среду газообразного азота [13, с. 4]. Стандартные морфологическими и биохимическими методами идентификации позволили установить принадлежность большего числа бактерий к роду *Desulfovibrio*, представленному мезофильными грамотрицательными бесспорными изогнутыми палочками размером $0,5 \times 4$ мкм [12, с. 14–18; 14].

Для реализации поставленной цели были выбраны хромсодержащие стали марок 13ХФА, 08ХМФА и 15Х5М, отличающиеся содержанием хрома и молибдена. В качестве образцов сравнения использовали кремнемарганцовистую сталь марки 17Г1С. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

По три образца каждой марки стали полировали, стерилизовали этанолом и подвешивали на леске во флаконы с анаэробной средой Постгейта «С». Затем вносили накопительную культуру СВБ в количестве 10% от объема питательной среды.

Бактерии культивировали в термостате при температуре $+30^\circ\text{C}$ в течение 5 суток. По одному образцу каждой марки стали фиксировали в течение суток в глутаральдегиде на какодилатном буфере с последующим обезвоживанием в серии растворов вода-ацетон, ацетон-килол [15, с. 279] и исследовали поверхность на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).

По два оставшихся образца каждой марки стали помещали во флаконы, заполненные стеклянными шариками и 5 см^3 стерильного фосфатного буферного раствора [16, с. 8], и счищали биопленку механическим встряхиванием. В полученной суспензии проводили определение белка по методу Лоури [17, с. 265–275], концентрации сероводорода методом Пахмайера [18, с. 454–458], дегидрогеназной активности – по реакции образования формазана [19, с. 61].

Эксперимент проводили в трехкратной повторности. Математическую обработку данных осуществляли общепринятыми статистическими методами в программе Excel.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены фотографии поверхности образцов испытанных марок стали.

Поверхность образца марки стали 17Г1С покрыта сплошной пленкой, состоящей из клеток СВБ, расположенных в несколько слоев. Образцы марок стали 13ХФА и 08ХМФА также покрыты плотной биопленкой СВБ, под которой невозможно различить микроструктуру стали. На поверхности образца стали марки 15Х5М присутствует наименьшее количество СВБ в виде отдельных клеток и небольших скоплений, под которыми четко различима микроструктура стали.

Формирование биопленок на поверхности имеет большое экологическое значение для бактерий, поскольку помогает аккумулировать питательные вещества, способствует защите от неблагоприятных условий и т.д. [20, с. 713–716; 21, с. 81; 22, с. 163]. По мнению D. Walsh, образование бактериями на поверхности стали пленки – микробного «слизистого» слоя – позволяет им регулировать химию поверхности [7, с. 23].

Массовая концентрация белка в бактериальной суспензии, полученной с поверхности стали 15Х5М, как и количество бактерий на ее поверхности, была наименьшей (табл. 2 и рис. 2). Показатели содержания белка для марок стали 17Г1С, 13ХФА и 08ХМФА достоверно не отличались между собой и превысили аналогичный показатель для стали 15Х5М более чем в 3 раза.

Исследователи Калифорнийского Политехнического Государственного университета (California Polytechnic State University) [7, с. 23–24] установили, что начальные стадии прикрепления бактерий к поверхности стали носят вероятностный характер и зависят в большей степени от условий окружающей среды. Однако в нашем эксперименте уже спустя 4 часа от его начала размножение бактерий и формирование биопленок на поверхности стали определялось ее микроструктурой и химическим составом, а именно количеством и составом легирующих элементов.

Поскольку образцы стали 13ХФА и 08ХМФА были покрыты сплошной биопленкой так же, как и образец сравнения, можно сделать вывод, что легирующие элементы Cr-V и Cr-Mo-V в количестве, указанном в табл. 1, не оказали влияние на прикрепление и размножение СВБ. Увеличенное содержания хрома в стали 15Х5М препятствовало размножению бактерий и образованию сплошной биопленки СВБ на ее поверхности.

Основным продуктом жизнедеятельности СВБ является сероводород. Концентрация сероводорода в бактериальной суспензии, полученной с поверхности образцов 13ХФА и 08ХМФА, была достоверно вы-

ше, а с поверхности стали 15Х5М примерно в 1,5 раза меньше, чем с поверхности образца сравнения. Похожая закономерность прослеживается в отношении активности фермента дегидрогеназы (табл. 2).

На образцах стали марок 13ХФА и 08ХМФА наблюдается повышение дегидрогеназной активности СВБ, а на образцах стали марки 15Х5М – ее значительное снижение по сравнению с образцом сравнения.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (масс.)								
	C	Si	Mn	Al	V	Cr	Mo	S	P
15Х5М	0,14	0,38	0,39	0,02	0,04	4,62	0,46	0,006	0,011
08 ХМФА	0,11	0,33	0,54	0,03	0,05	0,62	0,66	0,002	0,005
13ХФА	0,13	0,27	0,52	0,04	0,05	0,57	0,02	0,007	0,013
17Г1С	0,18	0,40	1,55	0,03	0,01	<0,01	–	0,040	0,030

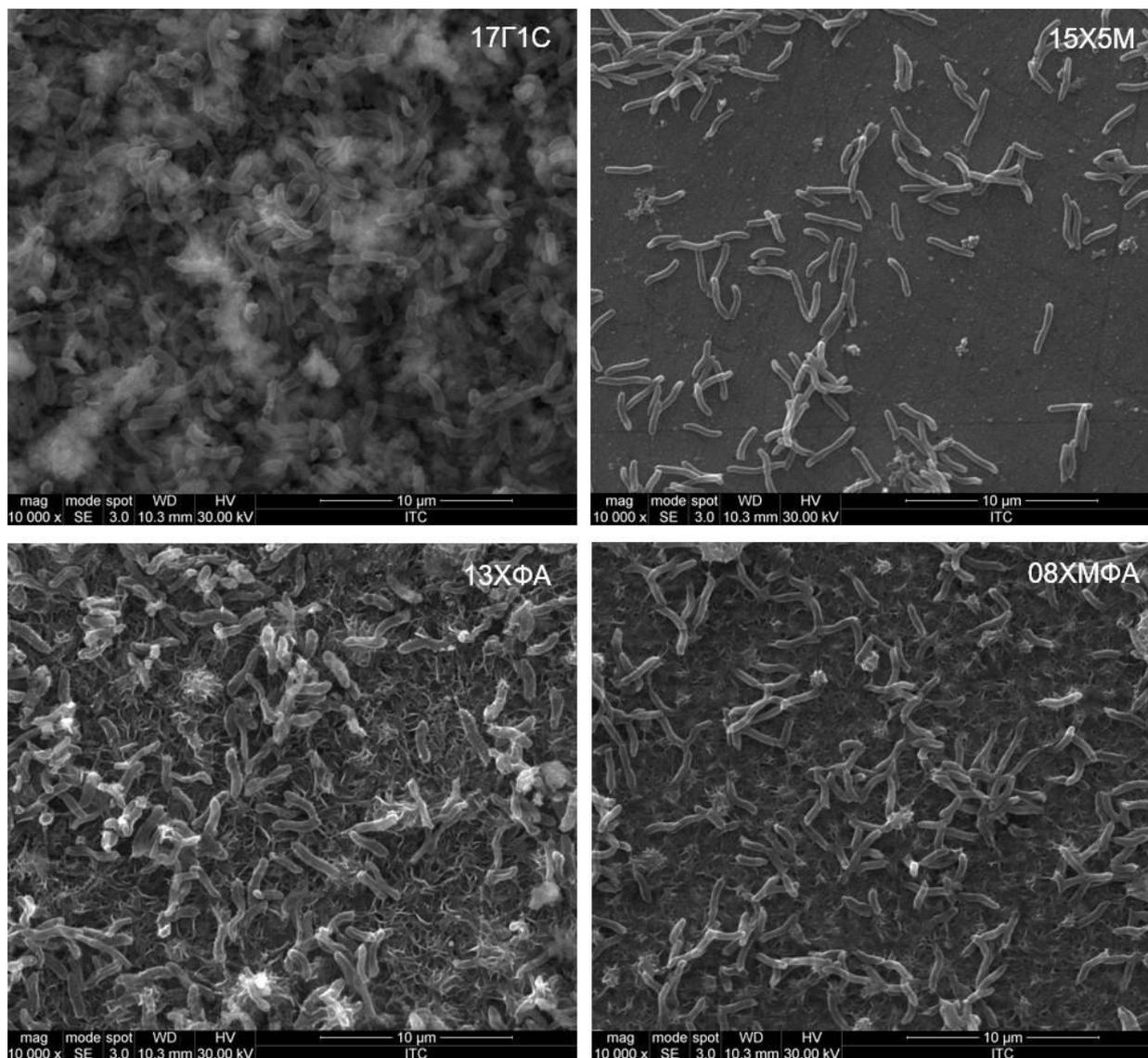


Рисунок 1 – Изображения поверхности стали марок 17Г1С, 15ХМФБЧА, 13ХФА, 08ХМФА, полученные с помощью СЭМ. Кратность увеличения ×10000

Таблица 2 – Количественные показатели биохимической активности сульфатвосстанавливающих бактерий, адгезированных на поверхности стальных образцов различных марок стали

Марка стали	Белок, мкг/см ³	Сульфиды, мг/дм ³	Дегидрогеназа, мкг/см ³
13ХФА	50,5 ± 23,7	16,6 ± 3,3	7,4 ± 3,3
08ХМФА	55,6 ± 26,3	15,0 ± 3,0	7,0 ± 3,2
15Х5М	16,3 ± 7,7	6,9 ± 1,4	0,5 ± 0,2
17Г1С	60,2 ± 28,3	9,7 ± 1,9	3,8 ± 1,7

Примечание. * показатели точности методик (границы относительной погрешности при доверительной вероятности 0,95) соответствуют относительной расширенной неопределенности измерений при коэффициенте охвата $k = 2$.

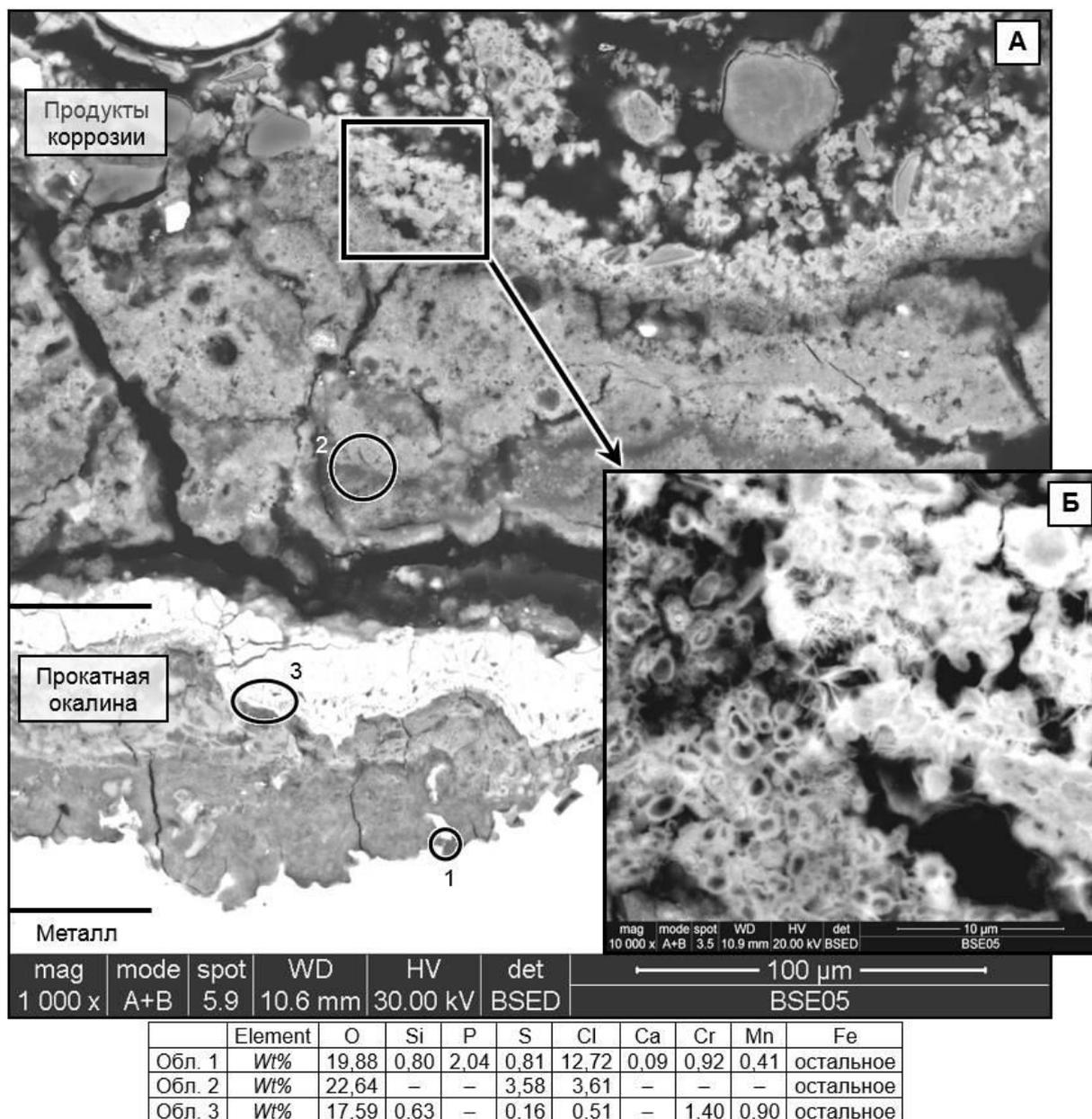


Рисунок 2 – Вид продуктов коррозии и локальных повреждений поверхности стальной трубы после эксплуатации на нефтяном месторождении Самарской области:

А – продольное сечение увеличение $\times 1000$ (в таблице представлены результаты локального энергодисперсионного химического анализа); *Б* – контуры бактериальных клеток

Изучение влияния соединений хрома на образование сероводорода бактериями рода *Desulfovibrio*, использующими лактат, показало, что небольшие концентрации хрома стимулируют процесс сульфатредукции, в то время как повышение его концентрации ведет к ингибированию этого процесса [5, с. 315–319]. Это доказывает наличие у бактерий рода *Desulfovibrio* механизмов адаптации к токсичному воздействию хрома.

Накопительная культура сульфатвосстанавливающих бактерий, использованных для испытания образцов стали, была выделена с внутренней поверхности стальной трубы, вышедшей из строя в результате локального сквозного разрушения. Энергодисперсионный химический анализ продольного сечения образца стали показал наличие хрома в продуктах коррозии с более высокой концентрацией, чем в матрице (рис. 2: *А*), что характерно для коррозионного про-

цесса хромистых сталей [3, с. 58]. Методом сканирующей электронной микроскопии удалось зафиксировать скопление бактерий в продуктах коррозии на поверхности поврежденной трубы (рис. 2: *Б*).

Можно предположить, что СВБ, выделенные из продуктов коррозии стали, содержащей хром, адаптировались к его влиянию, поэтому на поверхности стали марок 13ХФА и 08ХМФА, содержащих менее одного процента хрома, наблюдалась повышенная сульфатредукция по сравнению с образцом сравнения стали марки 17Г1С. Несмотря на то, что концентрация сероводорода, образованного бактериями на поверхности стали 15Х5М, была ниже, чем на образце сравнения, вряд ли можно утверждать об ингибирующем воздействии стали 15Х5М на сульфатредукцию, если учесть, что количество СВБ на ее поверхности было намного ниже, чем на образце сравнения.

По расчётам С. Ringas, F.P.A. Robinson [23, p. 395], фосфор и сера, входящие в состав стали, значительно снижают ее устойчивость к образованию питтингов в среде СВБ. Марганец также снижает устойчивость сталей к бактериальной коррозии, а хром и молибден, напротив, повышают ее. При этом наибольшим защитным действием обладает молибден. Поскольку авторы заключили, что на образование питтингов на поверхности углеродистых сталей влияет только способность СВБ образовывать сероводород, логично предположить, что хром и молибден должны снижать образование сероводорода бактериями.

По результатам нашего эксперимента удалось установить, что только сталь марки 15Х5М с содержанием хрома около 5% снижала продукцию сероводорода. Стали марок 13ХФА и 08ХМФА с содержанием хрома менее одного процента оказали стимулирующие действие на процесс сульфатредукции. Влияние молибдена в составе стали марок 15Х5М и 08ХМФА на активность СВБ установить не удалось. Такая неоднозначность полученных результатов, возможно, связана с тем, что в эксперименте С. Ringas и F.P.A. Robinson концентрация легирующих элементов была намного выше (молибдена более 2%, хрома – больше 11%), чем в нашем исследовании, а также с тем, что процесс питтингообразования в среде СВБ зависит не только от количества образованного ими сероводорода.

Н.А. Videla в своей статье обобщил 25-летний опыт изучения процессов биокоррозии и биообращения металлов и сплавов промышленного использования в лаборатории Института теоретических и прикладных физико-химических исследований (INIFTA) и сделал вывод, что в анаэробных условиях в присутствии СВБ, роль бактерий в коррозии углеродистой стали заключается (1) в анодном разрушении стали под действием биогенного сероводорода и (2) в разрушении по механизму катодной деполяризации под действием фермента дегидрогеназы [24, с. 258–259].

Основываясь на этих фактах, ранее мы предположили, что оценка количества и биохимической активности СВБ на поверхности образцов стали свидетельствует о ее стойкости к бактериальной коррозии [25, с. 49–50]. Однако ряд исследований доказывает, что прикрепившиеся СВБ могут как ускорять, так и замедлять процесс коррозии в зависимости от условий окружающей среды [24, с. 259; 26, с. 186–198]. Ускорение коррозии происходит, когда образованию биопленки предшествует образование пленки сульфида железа, а также при наличии в среде высоких концентраций (60 мг/дм^3) двухвалентного железа или свободного кислорода.

После 5 суток выдержки стальных образцов в среде СВБ не было обнаружено ни одного питтинга ни на стали сравнения 17Г1С, ни на хромистых сталях. Отсутствие питтингов на образцах исследованных марок стали, скорее всего, было связано с формированием на их поверхности биопленки сульфатовосстанавливающих бактерий (рис. 1), которая вызвала пассивацию стальной поверхности в бескислородной среде.

Увеличение времени экспозиции образцов стали в среде СВБ до одного месяца также не привело к образованию питтингов под бактериальными пленками.

Заключение

В эксперименте удалось установить влияние химического состава стали на количество и биохимическую активность бактерий, прикрепленных на ее поверхности.

Достоверное отличие показателей биохимической активности бактерий наблюдалось только для сталей, отличающихся концентрацией хрома. Содержание в составе стали хрома менее одного процента стимулировало образование сероводорода и дегидрогеназную активность адгезированных на ее поверхности сульфатовосстанавливающих бактерий, но не влияло на их количество. Повышение содержания хрома в стали до 5% достоверно снижало количество прикрепившихся к поверхности стали бактерий и угнетало их биохимическую активность.

Испытание образцов стали в анаэробной среде, содержащей сульфатовосстанавливающие бактерии, позволяет судить лишь о влиянии ее химического состава на их количество и биохимическую активность, но не об устойчивости стали к бактериальной коррозии.

Список литературы:

1. Подавалов Ю.А. Экология нефтегазового производства. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 416 с.
2. Ефимов А.А., Гусев Б.А., Пыхтеев О.Ю., Мартынов В.В., Оренкова И.Н., Мирошниченко И.В., Бахир С.Ю., Емелин С.И. Локальная коррозия углеродистых сталей нефтепромыслового оборудования // Защита металлов. 1995. № 6 (31). С. 604–608.
3. Денисова Т.В. Разработка стали повышенной прочности и коррозионной стойкости для производства нефтегазопроводных труб: дис. ... канд. тех. наук. Пенза, 2013. 128 с.
4. Пригула В.В. Коррозионная ситуация на газонефтепроводах России и их промышленная безопасность // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2015. № 2 (48). С. 6–10.
5. Карначук О.В. Влияние шестивалентного хрома на образование сероводорода сульфатовосстанавливающими бактериями // Микробиология. 1995. № 3 (64). С. 315–319.
6. Okabe S., Ito T., Satoh H. Sulfate-reducing bacterial community structure and their contribution to carbon mineralization in a wastewater biofilm growing under micro-aerophilic conditions // Applied Microbiology and Biotechnology. 2003. Vol. 63. P. 322–334. DOI: 10.1007/s00253-003-1395-3.
7. Walsh D., Pope D., Danford M., Huff T. The effect of microstructure on microbiologically influenced corrosion // JOM. 1993. Vol. 45. P. 22–30. DOI: 10.1007/BF03222429.
8. Walsh D. The implication of thermomechanical processing for microbiologically influenced corrosion // Corrosion. 1999. Paper № 188. P. 91–104.
9. Geesey G.G., Gillis R.J., Avci R., Daly D., Hamilton M., Shope P., Harkin G. The influence of surface features on bacterial colonization and subsequent substratum chemical changes of 316L stainless steel // Corrosion Science. 1996. Vol. 38, iss. 1. P. 73–95. DOI: 10.1016/0010-938x(96)00105-9.
10. Antony P.J., Singh Raman R.K., Raman R., Kumar P. Role of microstructure on corrosion of duplex stainless steel in presence of bacterial activity // Corrosion Science. 2010. Vol. 52, iss. 4. P. 1404–1412. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.12.003.

11. Борисенкова Е.А. Разработка и применение методов исследования влияния состава и структуры материалов стальных труб на коррозионную стойкость в нефтяных средах: дис. ... канд. тех. наук. Самара, 2016. 198 с.
12. Postgate J.R. The sulphate-reducing bacteria. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 224 p.
13. Назина Т.Н., Розанова Е.П., Беляев С.С., Иванов М.В. Химические и микробиологические методы исследования пластовых жидкостей и кернов нефтяных месторождений. Пушино: НЦБИ АН СССР, 1988. 25 с.
14. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уилльямса. М.: Мир, 1997. 800 с.
15. Уикли Б. Электронная микроскопия для начинающих. М.: Мир, 1975. 336 с.
16. NACE Standard TM0194-2004. Standard Test Method. Field Monitoring of Bacterial Growth in Oil and Gas Systems. Houston, Texas: NACE International, 2004. 17 p.
17. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent // The Journal of Biological Chemistry. 1951. Vol. 193, iss. 1. P. 265–275.
18. Cline J.D. Spectrophotometric determination of hydrogen sulfide in natural waters // Limnology and Oceanography. 1969. Vol. 14, iss. 3. P. 454–458.
19. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов: лабораторное руководство. Л.: Наука, 1974. 194 с.
20. Costerton J.W., Lewandowski Z. Microbial biofilm // Annual Review of Microbiology. 1995. Vol. 49. P. 711–745.
21. Заварзин Г.А., Колотилова Н.А. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом Университет, 2001. 226 с.
22. Jefferson K.K. What drives bacteria to produce a biofilm? // FEMS Microbiology Letters. 2004. Vol. 236. P. 163–173.
23. Ringas C., Robinson F.P.A. Corrosion of stainless steel by sulfate-reducing bacteria – electrochemical technics // Corrosion. 1987. Vol. 44, iss. 6. P. 386–396.
24. Videla H.A., Herrera L.K. Microbiologically influenced corrosion: looking to the future // International Microbiology. 2005. Vol. 8, iss. 3. P. 169–180.
25. Зайцева О.В., Кленова Н.А., Ширнина Е.В. Влияние химического состава стали на развитие биопленки сульфатовосстанавливающих бактерий // Экологический сборник: тр. молодых ученых Поволжья / под ред. проф. С.В. Саксонова. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2007. С. 45–50.
26. Lee W., Characklis W.G. Corrosion of mild steel under anaerobic biofilm // Corrosion. 1993. Vol. 49, iss. 3. P. 186–198.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Нестерова Екатерина Вячеславовна, аспирант кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: nevanest@yandex.ru.</p> <p>Веревкин Александр Григорьевич, кандидат химических наук, директор по развитию; Научно-производственный центр «Самара» (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: verevkin@npcsamara.ru.</p> <p>Прохорова Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор кафедры экологии, ботаники и охраны природы; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: natali.prokhorova.55@mail.ru.</p>	<p>Nesterova Ekaterina Vyacheslavovna, postgraduate student of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: nevanest@yandex.ru.</p> <p>Verevkin Aleksandr Grigorievich, candidate of chemical sciences, chief development officer; Research and Production Center «Samara» (Samara, Russian Federation). E-mail: verevkin@npcsamara.ru.</p> <p>Prokhorova Nataliya Vladimirovna, doctor of biological sciences, professor of Ecology, Botany and Nature Protection Department; Samara National Research University (Samara, Russian Federation). E-mail: natali.prokhorova.55@mail.ru.</p>

Для цитирования:

Нестерова Е.В., Веревкин А.Г., Прохорова Н.В. Исследование влияния химического состава высокоуглеродистой стали на активность прикреплённых сульфатовосстанавливающих бактерий // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10, № 4. С. 87–92. DOI: 10.17816/snv2021104113.