

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕФТЯНОГО МИКРОБОЦЕНОЗА
НА ПРОЦЕСС КОРРОЗИИ ТРУБНОЙ СТАЛИ**

© 2020

Нестерова Е.В.¹, Борисенкова Е.А.², Прохорова Н.В.¹¹*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(г. Самара, Российская Федерация)*²*Самарский государственный технический университет (г. Самара, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье представлены результаты модельных лабораторных экспериментов, осуществленных для оценки влияния бактерий нефтяного микробоценоза на процесс коррозии внутренних поверхностей нефтепроводных труб, произведенных из стали марки 17Г1С. Известно, что к бактериям этой группы чаще всего относятся углеводородокисляющие (УОБ), сульфатвосстанавливающие (СВБ), сероокисляющие, или тионовые (ТБ), и железоокисляющие бактерии (ЖБ). В модельных экспериментах с образцами стали 17Г1С были использованы коррозионно-опасные бактерии родов *Desulfotomaculum*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Sphaerotilus*, выделенные из поврежденного участка нефтепровода на месторождении в северной части Самарской области. В начальной фазе эксперимента титр анализируемых бактерий был достаточно высоким (СВБ – 10^4 – 10^5 , ТБ – 10^3 – 10^4 кл./см³), но к его концу из культуральной жидкости были высеяны только СВБ с количественными характеристиками 1–10 кл./см³, что может быть связано с высокой способностью к адгезии накопительных культур бактерий. На поверхности образцов стали методом электронной микроскопии были выявлены неравномерно распределенные рыхлые отложения, но клетки самих бактерий в них не просматривались. Морфологические особенности выявленных коррозионных отложений свидетельствовали об их бактериальном происхождении, которое было подтверждено также биохимическим анализом суспензии продуктов коррозии, в частности выявлением высокой массовой концентрации сульфидов, белка и фермента дегидрогеназы. Аэробные и анаэробные микробиологические взаимодействия, происходящие в нефтяном микробоценозе на внутренних поверхностях трубопроводов, экспериментально подтверждены и хорошо согласуются с данными других исследователей. Установлено, что основная роль в коррозионном разрушении образцов стали марки 17Г1С принадлежит СВБ, участие которых может осуществляться по двум основным механизмам: водородное растрескивание и анодное растворение железа. На поверхности стали образуются питтинги и сквозные отверстия, а скорость локальной коррозии может достигать 7,3 мм/год. Проведенные эксперименты доказали активную роль нефтяных микробоценозов, основу микробионта которых составляют 4 рода бактерий, в быстром разрушении нефтепроводов в Самарской области.

Ключевые слова: нефтяной микробоценоз; микробионт; консорциум микроорганизмов; коррозионно-опасные бактерии; *Desulfotomaculum*; *Paracoccus*; *Pseudomonas*; *Sphaerotilus*; адгезия бактерий; коррозия нефтепроводных труб; продукты коррозии; электронная микроскопия; трубная сталь 17Г1С.

**THE INVESTIGATION OF OIL MICROBIOCENOSIS INFLUENCE
ON THE CORROSION PROCESS OF PIPE STEEL**

© 2020

Nesterova E.V.¹, Borisenkova E.A.², Prokhorova N.V.¹¹*Samara National Research University (Samara, Russian Federation)*²*Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)*

Abstract. The paper presents the results of model laboratory experiments carried out to assess the influence of oil microbocenosis bacteria on the corrosion process on the internal surfaces of oil pipelines made of steel 17G1S. It is known that the bacteria of this group most often include hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB), sulfate-reducing bacteria (SRB), sulfur-oxidizing, or thionic (TB) and iron-oxidizing bacteria (IOB). In model experiments with 17G1S steel samples alloyed with 1% manganese we used corrosion-hazardous bacteria of the genera *Desulfotomaculum*, *Paracoccus*, *Pseudomonas* and *Sphaerotilus*, isolated from a damaged section of an oil pipeline at a field in the northern part of the Samara Region. In the initial phase of the experiment, the titer of the analyzed bacteria was quite high (SRB – 10^4 – 10^5 , TB – 10^3 – 10^4 cells/cm³), but by the end of the experiment, only sulfate-reducing bacteria with quantitative characteristics of 1–10 cells/cm³ were isolated from the culture liquid, may be due to the high adhesion capacity of mass cultures of the bacteria. On the surface of the steel samples the method of electron microscopy revealed unevenly distributed loose deposits, but the cells of the bacteria themselves were not visible in them. The morphological features of the revealed corrosion deposits indicated their bacterial origin, which was also confirmed by biochemical analysis of corrosion products suspension, in particular, by revealing a high mass concentration of sulfides, protein, and the dehydrogenase. Aerobic and anaerobic microbiological interactions occurring in the oil microbocenosis on the internal surfaces of pipelines have been experimentally confirmed and are in good agreement with the data of other researchers. It has been established that the main role in the corrosion destruction steel samples belongs to SRB, whose participation can be carried out according to two main mechanisms: hydrogen cracking and anodic dissolution of iron. Pits and through holes are formed on the steel surface, and the local corrosion rate can approach 7.3 mm/year. The experiments proved the active role of oil microbocenoses, the basis of the microbi-ont of which consists of four bacteria, in the rapid destruction of oil pipelines in the Samara Region.

Keywords: oil microbocenosis; microbiont; consortium of microorganisms; corrosive bacteria; *Desulfotomaculum*; *Paracoccus*; *Pseudomonas*; *Sphaerotilus*; adhesion of bacteria; corrosion of oil pipelines; corrosion products; electron microscopy; pipe steel alloyed with 1% manganese (17G1S).

Введение

Многочисленные исследования аварийных участков трубопроводов нефтяных месторождений Российской Федерации свидетельствуют о том, что одним из основных агентов коррозии труб является микробиом или консорциум микроорганизмов, представляющий собой живой компонент нефтяного микробиоценоза, формирующегося на внутренней поверхности трубопроводов в процессе их эксплуатации [1, с. 133–148; 2, с. 42]. К бактериям нефтяного микробиоценоза относят, как правило, четыре основные группы бактерий: углеводородокисляющие (УОБ), сульфатовосстанавливающие (СВБ), сероокисляющие, или тионовые (ТБ), и железоокисляющие бактерии (ЖБ) [3, с. 59–61; 4, с. 3–4; 5, с. 22; 6, с. 48; 7, с. 310]. Прикрепляясь к внутренней поверхности трубы в местах шероховатостей или поверхностных дефектов металла, бактерии в процессе жизнедеятельности выделяют коррозионные вещества (сероводород, углекислоту и др.), что приводит к возникновению или ускоренному росту уже образовавшегося локального повреждения [3, с. 61–105; 4, с. 4–7; 6, с. 49–50]. По понятным причинам натурные исследования микробозависимых процессов коррозии труб нефтепроводов затруднены, поэтому нами был использован метод моделирования нефтяного микробиоценоза реальных месторождений в лабораторных условиях, который позволяет изучать все основные этапы процесса микробиологической коррозии на поверхности стали [8, с. 100–103; 9, с. 5–7].

Целью данной работы было изучение влияния бактерий нефтяного микробиоценоза, выделенного из нефтепровода одного из месторождений северной части Самарской области, на процесс коррозии трубной стали марки 17Г1С, широко применяемой при производстве труб в Российской Федерации.

Объекты и методы исследований

Нефтяной консорциум бактерий (микробионт изучаемого микробиоценоза) был выделен из продуктов коррозии, отобранных с внутренней поверхности трубы в области ее сквозного повреждения после эксплуатации на нефтяном месторождении в северной части Самарской области.

Накопительные культуры основных групп бактерий, составляющих микробионт нефтяного микробиоценоза, получали внесением навески продуктов коррозии в жидкие элективные среды. СВБ культивировали на среде Постгейта «С» [10, с. 32] в анаэробных условиях, создаваемых пропуском через среду газообразного азота [11, с. 4]. ТБ выращивали на среде Бейринка [12, с. 35]. Для УОБ, окисляющих жидкие углеводороды, использовали среду Раймонда [13, с. 9] с внесением небольшого количества (не более 1%) стерильной нефти. Для выделения ЖБ применяли простую минеральную среду Вольфа [14, с. 207].

Идентификацию микроорганизмов проводили стандартными морфологическими и биохимическими методами с использованием оптического микроскопа Olympus BX43. Таксономическую принадлежность микроорганизмов устанавливали по определителю бактерий Берджи [15].

Во флакон емкостью 100 см³ с модельной средой [9, с. 5] вносили смесь накопительных культур бактерий в количестве 10% от объема питательной среды. Первоначальное количество внесенных бактерий определяли методом серийных разведений [13, с. 13; 16, с. 15]. Эксперимент проводили в трехкратной повторности.

Образцы стали марки 17Г1С обезжиривали, стерилизовали, выдерживали в эксикаторе в течение суток, взвешивали на аналитических весах с точностью до четвертого знака и помещали во флакон с модельной средой. Перед испытанием изучаемые образцы стали прошли одинаковую пробоподготовку. Контрольные образцы для предварительной оценки приповерхностных дефектов, связанных с пробоподготовкой (наклепы, задиры, шероховатости), были исследованы методами электронной микроскопии на предмет отсутствия подобных дефектов.

Бактерии культивировали в термостатах при температуре +45°C в течение 100 суток. Затем образцы стали извлекали из флакона. Один образец фиксировали в глутаральдегиде на какодилатном буфере с последующим обезвоживанием в серии растворов вода-ацетон, ацетон-ксилол [17, с. 279] и исследовали поверхность на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Кроме того, был проанализирован характер и размер локальных повреждений, а также элементный состав продуктов коррозии методом локального энергодисперсионного химического анализа и характеристического рентгеновского излучения. Два других варианта образцов использовали для биохимического анализа суспензии продуктов коррозии и определения скорости коррозии по ГОСТ 9.908-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости».

Потерю массы образца стали на единицу площади (скорость сплошной коррозии) выражали в толщине разрушенного металла в год и рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{V_c}{\gamma \cdot t} \cdot 10^{-3},$$

где C – толщина разрушенного металла в год, мм/год; V_c – среднее значение потерь массы двух образцов на единицу площади, г/м²; γ – плотность металла стали, г/см³, t – коэффициент пересчета времени испытания на год.

Скорость локальной питтинговой коррозии определяли микроскопически по максимальной глубине питтингов на поперечном шлифе при соответствующем увеличении.

Биохимический анализ коррозионных отложений включал определение белка по методу Лоури [18, с. 265–275], концентрации сероводорода методом Пахмайера [19, с. 454–458], дегидрогеназной активности – по реакции образования формазана [20, с. 61].

После извлечения образцов были сделаны посевы культуральной жидкости на элективные среды для определения количества бактерий каждой группы методом серийных разведений [13, с. 13; 16, с. 15].

Результаты и их обсуждение

Идентификация микроорганизмов, выделенных из продуктов коррозии, позволила установить родовую принадлежность культуры СВБ к спорообразующему роду *Desulfotomaculum*, ТБ – к роду *Paracoccus*, УОБ – к роду *Pseudomonas* и ЖБ – к роду *Sphaerotilus* [10, с. 18; 15].

Количество бактерий, первоначально внесенных в модельную среду, было достаточно большим (табл. 1). Титр наиболее коррозионно-опасных сульфатвосстанавливающих бактерий составил 10^5 кл./см³.

Несмотря на первоначально высокий титр бактерий, к концу эксперимента из культуральной жидкости были высеяны только СВБ в первом разведении, что соответствует количеству 1–10 клеток в 1 см³. Это может быть связано с высокой способностью к адгезии накопительных культур бактерий, которые обитали в условиях нефтяного микробиоценоза на внутренней поверхности труб еще до начала эксперимента [21, с. 59].

Определение доли адгезированных бактерий в продуктах коррозии было затруднено ввиду их малого количества. Кроме того, обнаружение жизнеспособных бактерий в среде или твердом образце продуктов коррозии не всегда служит доказательством наличия микробиологически вызванной коррозии (МИС) на внутренней поверхности трубопроводов [22, с. 23]. Для подтверждения бактериального происхождения локальных повреждений был проведен биохимический анализ суспензии продуктов коррозии.

Биохимический анализ продуктов коррозии, отобранных с поверхности металлического образца, показал высокую массовую концентрацию белка и дегидрогеназы (табл. 2). Наличие ферментативной активности дегидрогеназы указывает на присутствие в коррозионных отложениях живых бактерий и служит одним из показателей коррозии (МИС), вызванной микроорганизмами внутренних поверхностей трубопроводов [22, с. 16].

Следует отметить, что небольшое количество СВБ в среде к концу эксперимента не коррелирует с высокой активностью адгезированных форм бактерий и наличием глубоких локальных повреждений. При мониторинге скорости коррозии нефтепроводов для оценки степени участия бактериального фактора применяется показатель, отражающий зараженность попутно-добываемой воды СВБ [13, с. 11]. Учитывая вышесказанное, определение количества бактерий в среде не может быть достаточным показателем для оценки локальных процессов коррозии, происходящие на внутренней поверхности трубы.

На рис. 1 представлены снимки поверхности образца после выдержки в модельной среде нефтяного микробиоценоза при различных увеличениях. Снимки

свидетельствуют, что в процессе испытания на поверхности металла образовались рыхлые, неравномерно распределенные отложения. Клетки самих бактерий в этих отложениях не выявили.

На рис. 2 представлен снимок продольного сечения образца изучаемой стали в упруго-отраженном излучении электронов. Отложения толщиной ~250 мкм имеют рыхлую и неоднородную морфологию (рис. 2: а, б), характерную для микробиологической коррозии [2, с. 44; 9, с. 6]. Локальный энергодисперсионный химический анализ, проведенный в характерных областях сечения (рис. 2: в), выявил присутствие в сечении соединений серы, оксидов железа и марганца. Наглядное распределение слоев с различным химическим составом дает исследование в характеристическом рентгеновском излучении, результаты которого представлены на рис. 3. Из рисунка следует, что слой с высоким содержанием серы расположен сверху, а под ним располагаются прослойки с оксидом железа и марганца. Кроме того, в слое продуктов коррозии присутствует кремний, как было выявлено ранее методом локального энергодисперсионного химического анализа (рис. 2: в). Подобное распределение элементов и состав слоев был ранее описан Е.А. Борисенковой [8, с. 100–103].

Судя по морфологии и стехеометрическому составу продуктов коррозии в верхней области отложений можно предположить, что это смесь гидрооксидов железа (FeO(OH)) и сульфидов железа (FeS). Это объясняется механизмом формирования бугорка на поверхности образца металла [8, с. 101]. На начальном этапе ЖБ в процессе диссимилиации окисляют ионы железа (II), что приводит к отложению на поверхности образца нерастворимого гидроксида железа (III). Адгезированные на поверхности СВБ восстанавливают сульфаты до сероводорода, который может вступать в реакцию с гидроксидом железа с образованием сульфида железа. Кроме этого, внутри микробиоценоза происходит синтрофное взаимодействие бактерий, когда продукты жизнедеятельности одних микроорганизмов служат необходимым энергетическим субстратом для активного роста других [23, с. 214]. Отсутствующие в модельной среде органические вещества, необходимые для СВБ, поставляют УОБ. Сульфиды, образованные СВБ, могут служить источником энергии для ТБ. ТБ образуют сульфаты, которые используются СВБ. В результате такой синтрофии процесс коррозии может протекать непрерывно, вызывая при этом значительное разрушение внутренней поверхности металла нефтяного трубопровода [4, с. 5–6].

Таблица 1 – Количество бактерий в модельной среде

Первоначальное количество бактерий, кл./см ³				Количество бактерий после эксперимента, кл./см ³			
УОБ	СВБ	ТБ	ЖБ	УОБ	СВБ	ТБ	ЖБ
10–10 ²	10 ⁴ –10 ⁵	10 ³ –10 ⁴	10–10 ²	0	1–10	0	0

Таблица 2 – Показатели бактериальной коррозии стали 17Г1С после выдержки образцов в среде нефтяного микробиоценоза

Биохимические показатели*			Скорость коррозии, мм/год	
Мас. конц. белка, мг/см ³	Мас. конц. сульфидов, мг/дм ³	Мас. конц. ДГ-азы, мг/см ³	Сплошная коррозия*	Питтинговая коррозия
124,7 ± 59,9	296 ± 59,2	242,4 ± 109,1	0,33 ± 0,06	7,3

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

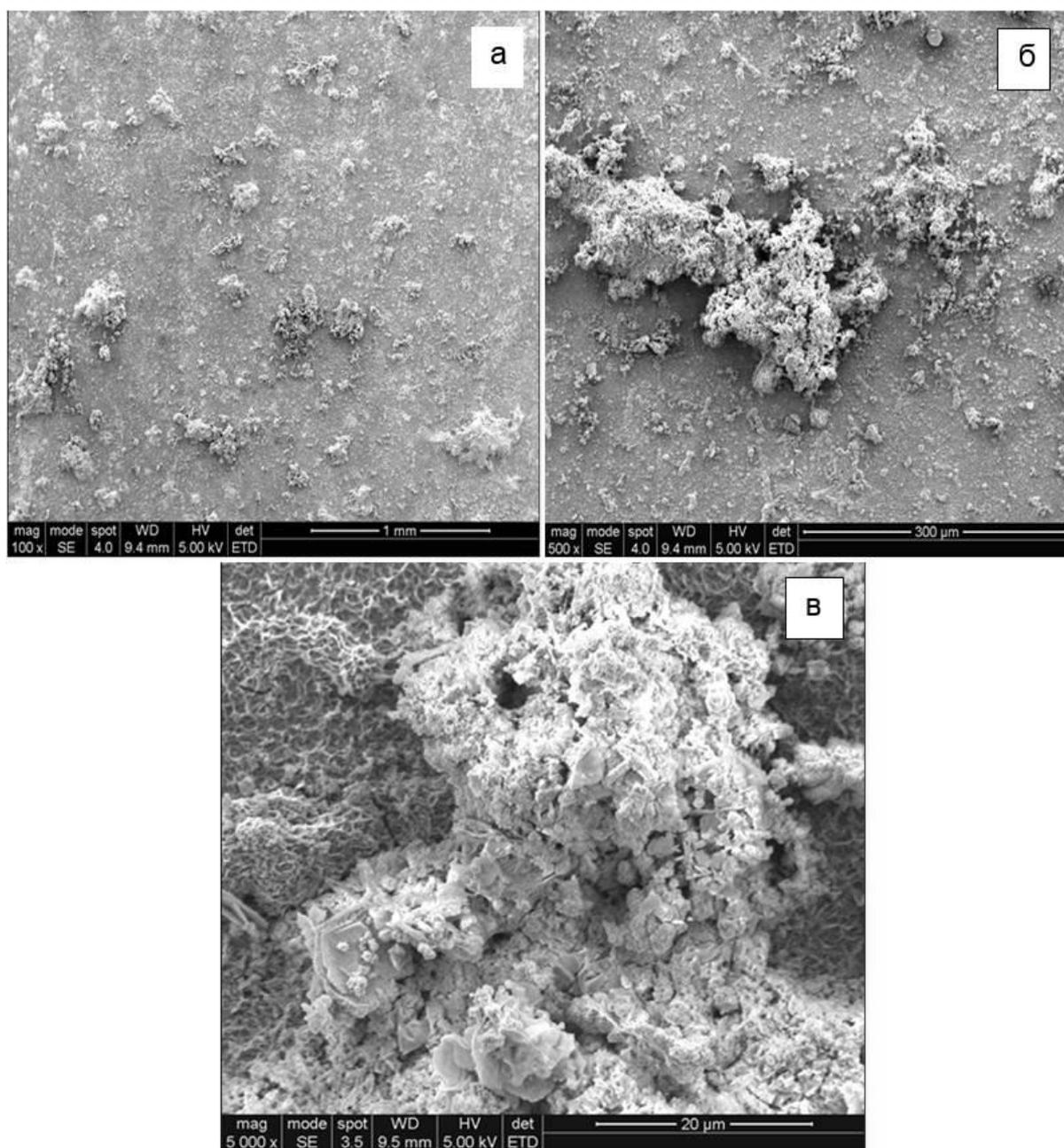


Рисунок 1 – Рыхлые отложения на поверхности стали, образованные бактериями нефтяного микробиоценоза.
Кратность увеличения: *а* – $\times 100$, *б* – $\times 500$, *в* – $\times 5000$

Аэробные бактерии (УОБ, ЖБ и ТБ), потребляя кислород, создают под отложениями благоприятные анаэробные условия для развития СВБ. Об активной деятельности СВБ свидетельствует наличие серы (яркая область) в подповерхностном слое металла (рис. 3).

Биохимический анализ суспензии продуктов коррозии, снятых с поверхности образца металла, установил совместное наличие высокой концентрации сульфидов и дегидрогеназы бактерий (табл. 2), что подтверждает бактериальный характер повреждения. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, описанными ранее в специальной литературе [3, с. 59; 4, с. 7].

Основная роль в коррозионном разрушении металла принадлежит СВБ [3, с. 62; 4, с. 36; 8, с. 103]. Существует два основных механизма воздействия СВБ на коррозию стали: водородное растрескивание и анодное растворение железа. В процессе сульфатредукции бактерии выделяют большое количество коррозионно-опасного агента сероводорода. Из-

вестно, что сероводород является мощным промотором наводороживания (водородной хрупкости) стали, что приводит к коррозионному растрескиванию. Согласно данным В.И. Вигдоровича [24, с. 101], поток диффузии водорода через стальную мембрану значительно возрастает в присутствии именно биогенного сероводорода. Образующиеся при взаимодействии сероводорода и ионов железа сульфиды снижают коррозионную стойкость стали за счет стимулирования анодного растворения железа. Согласно теории катодной деполяризации [3, с. 52], анодное растворение железа также может происходить при непосредственном поглощении бактериями атомного водорода с катода. Для осуществления такого механизма коррозии необходим фермент дегидрогеназа. В результате таких воздействий на поверхности стали образуются питтинги (глубокие точечные повреждения) и сквозные язвы (широкие углубления с кратерообразными краями), что ведет к порывам трубопроводов уже через 3–6 месяцев после ввода в эксплуатацию [4, с. 7].

Прикрепленные к поверхности стали бактерии, проявляющие дегидрогеназную активность, вызвали глубокие локальные повреждения в виде питтингов, обнаруженных под отложениями продуктов коррозии (рис. 3). Скорость локальной коррозии, определенная по максимальной глубине локальных повреждений, составила 7,3 мм/год. Учитывая, что в ре-

альных промышленных условиях в транспортируемой среде содержатся химические коррозионно-активные компоненты (сероводород, углекислый газ, хлор и др.), локальная коррозия, вызванная наличием бактерий нефтяного микробиоценоза, может приводить к возникновению сквозных дефектов труб и аварий.

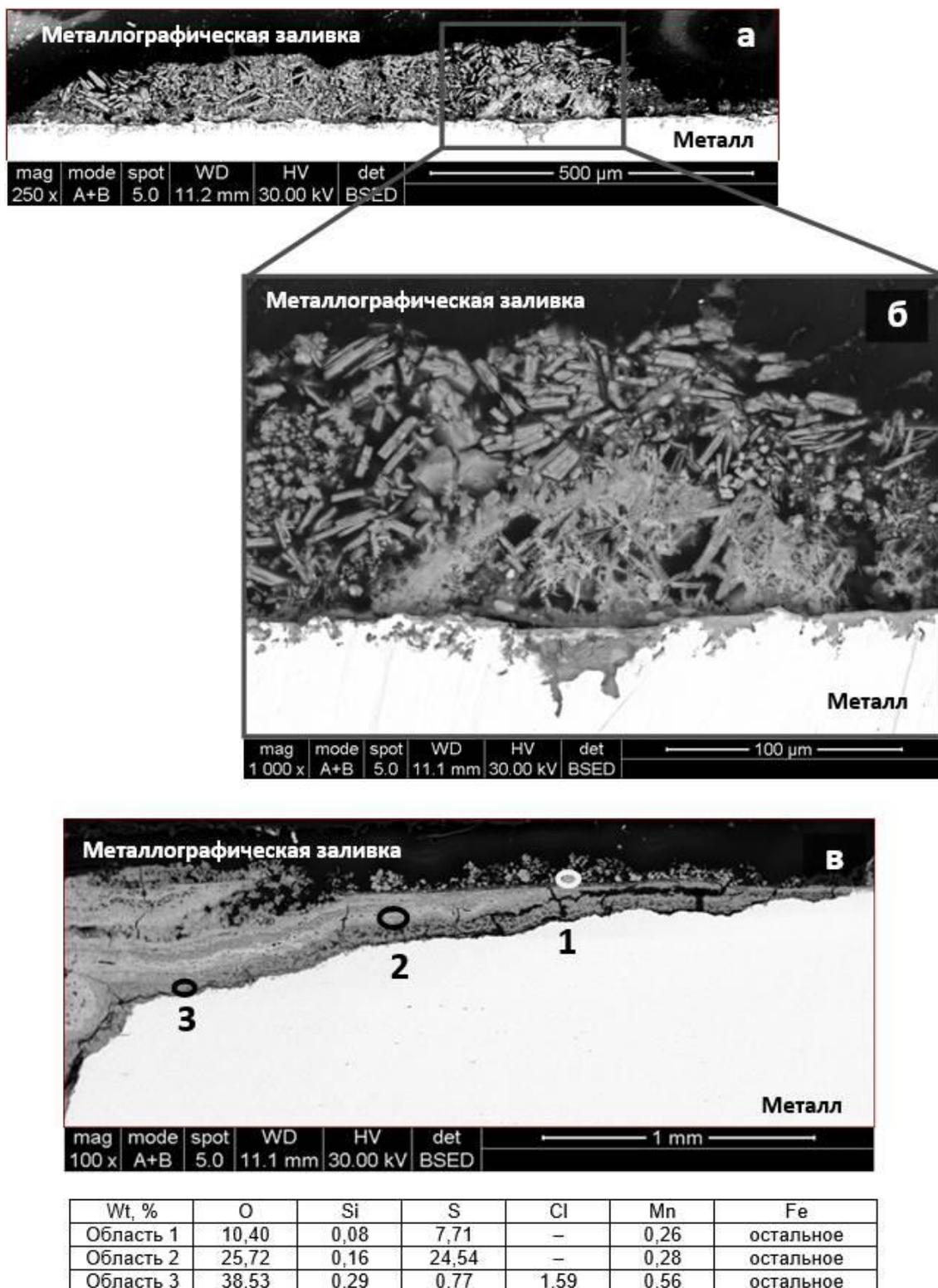


Рисунок 2 – Вид продуктов коррозии и локальных повреждений поверхности образца стали после испытания в среде бактерий нефтяного микробиоценоза:

a – продольное сечение увеличение $\times 250$;

б – продольное сечение увеличение $\times 1000$;

в – результаты локального энергодисперсионного химического анализа

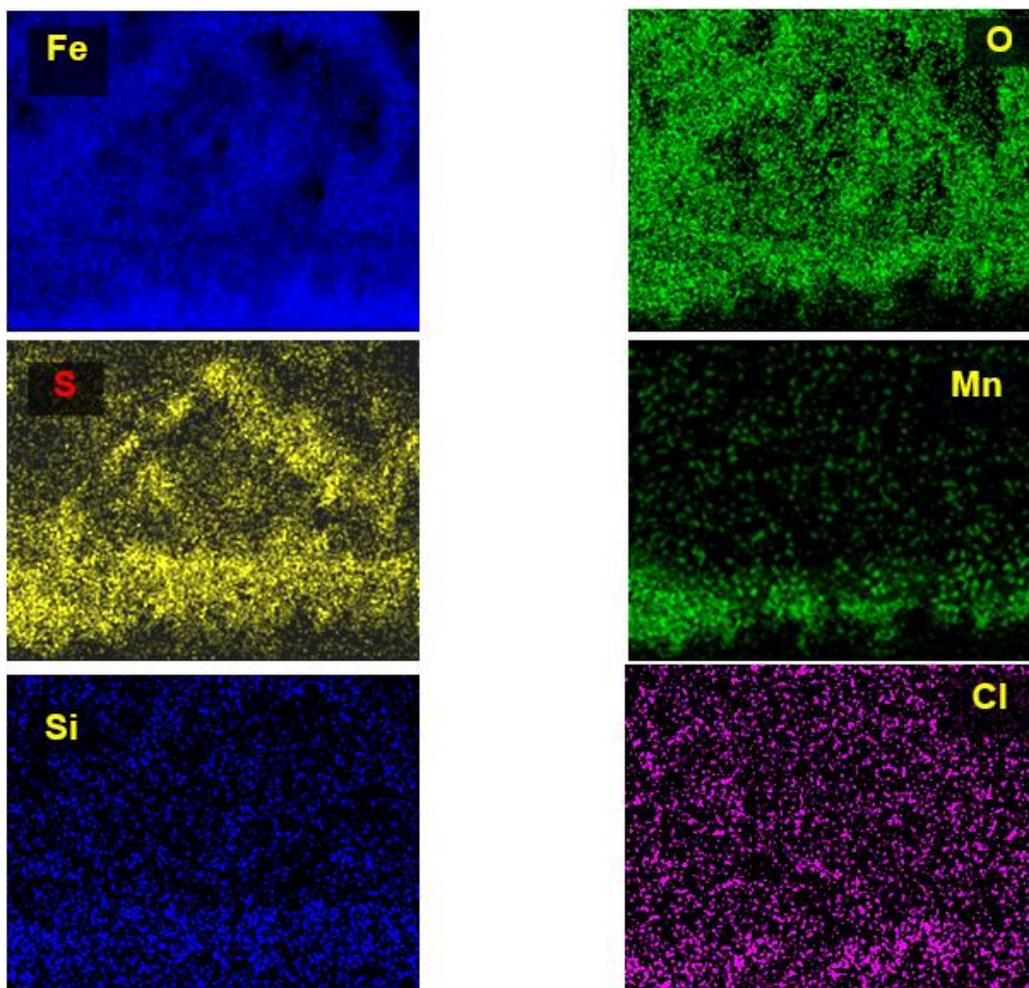
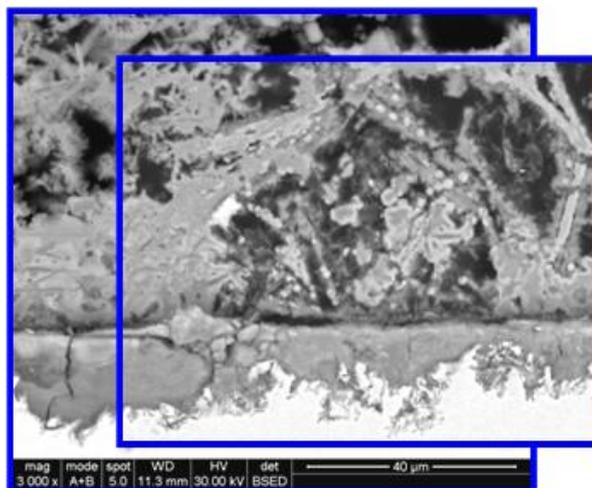


Рисунок 3 – Сечение бугорка, состоящего из продуктов коррозии, в характеристическом рентгеновском излучении железа, кислорода, серы, марганца, кремния и хлора

Заключение

Бактерии нефтяного микробоценоза, выделенные с внутренней поверхности трубопровода на месторождении в северной части Самарской области, в ходе модельного эксперимента образуют на поверхности образца стали специфические отложения, под которыми происходит ее локальная коррозия. Количество бактерий в среде не коррелирует с активностью их адгезированных форм и наличием локальных повреждений на поверхности стали. Одновременное присутствие в продуктах коррозии, снятых с поверхности образца, сульфидов и фермента дегидрогеназы

указывает на бактериальный характер повреждения. Скорость локальной коррозии под коррозионными отложениями может достигать 7,3 мм/год, что подтверждает активную роль бактерий нефтяных микробоценозов в разрушении нефтепроводов в Самарской области.

Список литературы:

1. 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: 05.16.09. Самара, 2016. 198 с.

2. Иоффе А.В., Борисенкова Е.А. Коррозия НКТ под воздействием биоценоза в скважинах ТПП «Лукойл-Усинскнефтегаз»: методы выявления и пути решения проблемы // Инженерная практика. 2011. № 8. С. 42–49.
3. Андреев Е.А., Козлова И.А. Литотрофные бактерии и микробиологическая коррозия. Киев: Наукова думка, 1977. 164 с.
4. Little B.J., Wagner P.A. Microbiologically influenced corrosion // Peabody's Control of Pipeline Corrosion. Houston, TX: NACE, 1967. P. 273–284.
5. Розанова Е.П., Кузнецов С.И. Микрофлора нефтяных месторождений. М.: Наука, 1994. 198 с.
6. Борисенкова Е.А., Веревкин А.Г., Борисенкова Т.А. Современный подход к выбору материалов для изготовления нефтегазопроводных труб в зависимости от преобладающего механизма коррозии // Черная металлургия. 2014. № 12. С. 47–51.
7. Назина Т.Н., Беляев С.С. Биологическое и метаболическое разнообразие микроорганизмов нефтяных месторождений // Труды Института микробиологии им. С.Н. Виноградского. 2004. Вып. XII. С. 289–316.
8. Борисенкова Е.А., Сачкова Е.Н., Иоффе А.В. О механизме микробиологической коррозии сталей нефтепромышленного оборудования в условиях эксплуатации и в лаборатории // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2013. № 3 (39). С. 99–104.
9. Способ испытания сталей на стойкость к микробиологической коррозии: патент 2432565 Российская Федерация № 2010136182/28; заявл. 27.08.2010; опубл. 27.10.2011.
10. Postgate J.R. The sulphate-reducing bacteria. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 224 p.
11. 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.
12. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.
13. РД 39-3-973-83. Методика контроля микробиологической зараженности нефтепромышленных вод и оценка защитного и бактерицидного действия реагентов / под ред. Л.В. Батурина. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1983. 32 с.
14. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 285 с.
15. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. М.: Мир, 1997. 800 с.
16. NACE Standard TM0106-2016. Detection, Testing, and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) on External Surfaces of Buried Pipelines. Houston, TX: NACE, 2016. 21 p.
17. Уикли Б. Электронная микроскопия для начинающих. М.: Мир, 1975. 336 с.
18. 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, № 1. P. 265–275.
19. Cline J.D. Spectrophotometric determination of hydrogen sulfide in natural waters // Limnology and Oceanography. 1969. Vol. 14, № 3. P. 454–458.
20. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов: лабораторное руководство. Л.: Наука, 1974. 194 с.
21. Зайцева О.В. Биотехнологические приемы оценки устойчивости сталей к коррозии, вызываемой бактериальной сульфатредукцией, и пути повышения коррозионной устойчивости нефтегазового оборудования: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.23. Уфа, 2009. 140 с.
22. NACE Standard TM0102-2012. Detection, Testing, and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion on Internal Surfaces of Buried Pipelines. Houston, Texas: NACE International, 2012. 37 p.
23. Заварзин Г.А., Колотилова Н.А. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом Университет, 2001. 226 с.
24. Вигдорович В.И., Завершинский А.Н. Влияние СРБ на диффузию водорода через стальную мембрану и бактерицидное действие дигидроксиазосоединений // Защита металлов. 2003. Т. 39, № 1. С. 100–104.

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>Борисенкова Екатерина Александровна, кандидат технических наук, ассистент кафедры металловедения, порошковой металлургии и наноматериалов; Самарский государственный технический университет (г. Самара, Российская Федерация). E-mail: rudri@yandex.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>Borisenkova Ekaterina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, assistant of Metal Science, Powder Metallurgy and Nanomaterials Department; Samara State Technical University (Samara, Russian Federation). E-mail: rudri@yandex.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., Борисенкова Е.А., Прохорова Н.В. Исследование влияния нефтяного микробиоценоза на процесс коррозии трубной стали // Самарский научный вестник. 2020. Т. 9, № 4. С. 125–131. DOI: 10.17816/snv202094119.