

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ И ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ / PHYSICO-CHEMICAL AND GENERAL BIOLOGY

Оригинальная статья / Original article

УДК 620.193.81

DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-80-88

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ БИОТРАНСФОРМАЦИИ КИСЛОРОДА БАКТЕРИЯМИ-ОРГАНОТРОФАМИ В ПЕРОКСИД ВОДОРОДА, СТИМУЛИРУЮЩИЙ КОРРОЗИЮ ЦИНКА

© А.А. Калинина, С.Ю. Радостин, А.С. Македошин, Т.Н. Соколова, В.Ф. Смирнов,
В.Р. Карташов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Российская Федерация, 603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, д. 24, ГСП-41

*Цель – выявление влияния условий культивирования бактерий-органотрофов на секретирование пероксида водорода при воздействии бактерий на поверхность цинка. В работе проведено исследование влияния состава питательной среды: мясо-пептонный агар и глюкозо-минеральная среда. Показано, что культивирование грамположительных бактерий *Bacillus subtilis* и *Clostridium spp.* на среде мясо-пептонный агар сопровождается образованием пероксида водорода в меньшем количестве, чем при культивировании бактерий на глюкозо-минеральной среде. Воздействие грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas fluorescens* на поверхность цинка в благоприятных для жизнедеятельности условиях приводит к образованию пероксида водорода в большем количестве.*

Ключевые слова: бактерии, биотрансформация кислорода, супероксидный анион, пероксид водорода, стимулирование биокоррозии, цинк.

Формат цитирования: Калинина А.А., Радостин С.Ю., Македошин А.С., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Карташов В.Р. Моделирование условий биотрансформации кислорода бактериями-органотрофами в пероксид водорода, стимулирующий коррозию цинка // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7, N 1. С. 80–88. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-80-88

MODELING OF BACTERIA-ORGANOTROPHS OXYGEN BIOTRANSFORMATION TO HYDROGEN PEROXIDE STIMULATING ZINC CORROSION

© A.A. Kalinina, S.Y. Radostin, A.S. Makedoshin, T.N. Sokolova, V.F. Smirnov,
V.R. Kartashov

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,
24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation.

*The effect of nutrient medium composition on the release of bacteria acting on the surface of zinc, hydrogen peroxide as a product of oxygen biotransformation electron-transport circuit components of bacteria were studied. It is shown that cultivation of gram-positive bacteria *Bacillus subtilis* and *Clostridium spp.* on a meat peptone agar medium was accompanied by the formation of hydrogen peroxide in a smaller amount as against bacteria when cultured on glucose mineral medium. Impact of gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Pseudomonas fluorescens* on zinc surface in favorable conditions for the vital activity leads to the high hydrogen peroxide formation.*

Keywords: bacteria, oxygen biotransformation, superoxide anion, hydrogen peroxide, biocorrosion stimulation, zinc

For citation: Kalinina A.A., Radostin S.Y., Makedoshin A.S., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Kartashov V.R. Modeling of bacteria-organotrophs oxygen biotransformation to hydrogen peroxide stimulating zinc corrosion. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2017, vol. 7, no. 2, pp. 80–88. (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-80-88

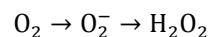
ВВЕДЕНИЕ

Известно, что металлоконструкции промышленных, оборонных, социальных объектов, эксплуатируемых в естественной среде, в условиях повышенной влажности и положительных климатических температур, морской воде, почве подвергаются, как правило, коррозионным повреждениям в существенно большей степени, чем можно прогнозировать. Огромный ущерб, наносимый экономике, и негативные экологические последствия в окружающей среде привели в середине прошлого столетия к поиску дополнительных факторов, усиливающих коррозионные повреждения металлов, что способствовало формированию нового направления в этой области – биологической коррозии. Начиная с первой половины прошлого столетия, биологический фактор в стимулировании коррозии металлов в условиях, благоприятных для жизнедеятельности микроорганизмов, стал рассматриваться как один из приоритетных. Общеизвестным является положение об опосредованном характере микробиологического воздействия на металлы через агрессивные экзосметаболиты [1–3]. Природа некоторых из них и пути образования в клетках доказаны однозначно: тيوبактерии продуцируют серную кислоту, нитрозо- и нитробактерии окисляют ион аммония до азотистой, а азотистую – до азотной кислоты, отдельные штаммы ацидофильных бактерий способны биотрансформировать неорганические соединения серы до серной кислоты. Достижения и методы исследования биокоррозии нашли отражение в ряде обзорных статей [1–5]. Вместе с тем в природе широко представлены бактерии-органотрофы. Большинство исследователей придерживаются мнения, что в коррозионном повреждении металлов бактериями-органотрофами главную роль играют экзоферменты и органические кислоты [1, 2]. Следует отметить, что в большинстве случаев исследования коррозионной активности бактерий-органотрофов проводились в жидкой среде [6–7]. Воздействие этого вида бактерий на поверхность металлов без участия жидкой внешней среды изучается в настоящее время, как правило, на предмет формирования биопленок, их свойств, химического состава [8–10]. Выводы о связи биопленок бактерий-органотрофов с коррозионными повреждениями металла единичны, как и сведения о химической природе стимулирующего фактора.

В ряде работ нами сделано предположение, что стимулирующую роль в биокоррозии металлов могут играть продукты биотрансформации кислорода компонентами электронотранспортной цепи микроорганизмов [11, 12]. В их числе равновесная пара супероксид-

ный ион O_2^- и его протонированная форма гидропероксидный радикал OOH , а также стабильное соединение диспропорционирования супероксидного аниона – пероксид водорода. Механизмы образования их в клетках, свойства хорошо изучены как *in vivo*, так и *in vitro* [13–15], но возможность их вовлечения в стимулирование коррозионного повреждения металлов ранее другими исследователями не обсуждалась.

На наш взгляд, роль электронного транспорта в системе превращений



можно выявить, если смоделировать для жизнедеятельности бактерий граничные условия: наиболее оптимальные по составу питательной среды – это МПА, а так называемые «острые» условия, когда бактерии лишены источника азота, но за счет наличия органического углерода могут поддерживать свою жизнедеятельность.

В связи с чем, цель работы в моделировании условий культивирования бактерий-органотрофов и выявление их влияния на секретируемые пероксида водорода при воздействии бактерий на поверхность цинка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования – цинк, который рекомендован стандартами ИСО 9223-2012 для проведения биокоррозионных исследований, образцы готовили к эксперименту, как описано в работе [12].

В качестве тест-культур использовали музейные штаммы бактерий *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* и *Clostridium spp.*

В качестве питательной среды использовали, с одной стороны, оптимальную для жизнедеятельности бактерий мясopептонный агар (МПА), с другой стороны, глюкозо-минеральную среду, моделирующую естественную безазотистую, содержащую тригидрат гидрофосфата калия ($K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$) – 1,0 г; гептагидрат сульфата магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) – 0,2 г; гептагидрат сульфата железа ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) – 0,05 г; моногидрат хлорида кальция ($CaCl_2 \cdot H_2O$) – 0,1 г; дигидрат молибдата натрия ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$) – 0,001 г; глюкозу ($C_6H_{12}O_6$) – 10,0 г; воду дистиллированную – до 1000,0 см³.

Биологические эксперименты проводили, как описано в работах [11, 12].

Концентрацию H_2O_2 в экссудате определяли по реакции восстановления его большим избытком иодида калия в щелочной среде при катализе гетерополиоксидом $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ по методике [16]. Содержание аммиака в

экссудате определяли индофенольным методом [17]. Количественные эксперименты проводили не менее чем в 4–5 повторностях, в каждой повторности использовали усредненный экссудат (~ 0,1–0,2 мл), собранный с поверхности 3–4 образцов цинка.

Значение pH экссудата определяли с использованием прибора марки pH-METR N5123 (Польша). УФ-спектры регистрировали на спектрофотометре UNICO 2800. Микроскопические исследования поверхности металлов осуществляли на приборе СЭМ (Tescam Vega II, Чехия).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами установлено, что уже через 3-е сут экспозиции цинка на среде МПА, инокулированной бактериями, происходит активное заселение его поверхности. На микрофотографии, представленной на рис. 1, а, четко видна биомасса, состоящая из клеток бактерий и внеклеточных веществ.

Заселение металла бактериями визуально проявляется в изменении состояния поверхности (рис. 1, б). Как видно из рис. 1, б, на начальном этапе воздействия микроорганизма на металл на торцах и гранях металла появляется жидкая фаза, так называемый экссудат, со значением pH >7. Следует отметить, что появление жидкого экссудата на отдельных участках поверхности металла явилось для нас предпосылкой вывода о стимулирующей роли в коррозии металлов продуктов биотрансформации кислорода. Впервые эффект образования основного экссудата мы наблю-

дали в опытах с микромицетами, воздействующими на поверхность алюминия и его сплавов через 3–5 сут экспозиции [18–20]. Экссудат имел высокое значение pH даже при воздействии кислотообразующих микромицетов. Было сделано предположение, что на ранних этапах воздействия на металл микромицетов коррозию стимулирует супероксидный ион. Схема инициирования коррозии и косвенные доказательства участия в этом процессе супероксидного иона представлены нами в работах [18–20]. Попытки перенести предложенную для микромицетов схему стимулирования коррозии металлов на бактерии не дали в начале положительного результата. Отсутствие жидкого основного экссудата на поверхности алюминия и его сплавов при воздействии бактерий-органотрофов привело к ошибочному выводу, что продукты биотрансформации кислорода могут играть определяющую роль в стимулировании коррозии только под воздействием эукариотических клеток микромицетов с развитой митохондриальной системой как главного источника O_2^- . Однако в более поздних исследованиях было обнаружено, что при использовании в качестве объекта изучения цинка или цинка, нанесенного на сталь, экссудат с pH >7 образовывался и под воздействием бактерий-органотрофов [11, 12]. Образование на поверхности цинка жидкого экссудата (рис. 1, б) дает возможность анализа его химического состава и выявления химических соединений, стимулирующих коррозию. Исследуемый цинк оказался удобным объектом в том плане, что экссудат на его поверхности сохраняет



а



б

Рис. 1. Микрофотографии поверхности цинка спустя 3 сут экспозиции под воздействием бактерии *Bacillus subtilis* среде МПА (а); изменение состояния поверхности цинка через 9 сут, питательная среда МПА, pH = 11 (б)

жидкое состояние достаточно продолжительно, что позволяет проводить его анализ до времени экспозиции 20 суток и более, вплоть до истощения питательной среды. Как видно из данных, представленных на рис. 2, значение $\text{pH} > 7$ уже на ранних стадиях экспозиции цинка, и его значение достигает величин $10,5 \div 10,95$, как при использовании МПА, так и глюкозо-минеральной среды. Одним из биогенных

факторов, влияющих на значение pH , является аммиак, в форме которого бактерии освобождаются от избыточного азота. Поскольку среда МПА содержит в качестве основного компонента белок, то анализ экссудата на содержание аммиака, действительно, подтверждает его высокую концентрацию в первые сутки экспозиции вплоть до 5 ммоль/л (рис. 3).

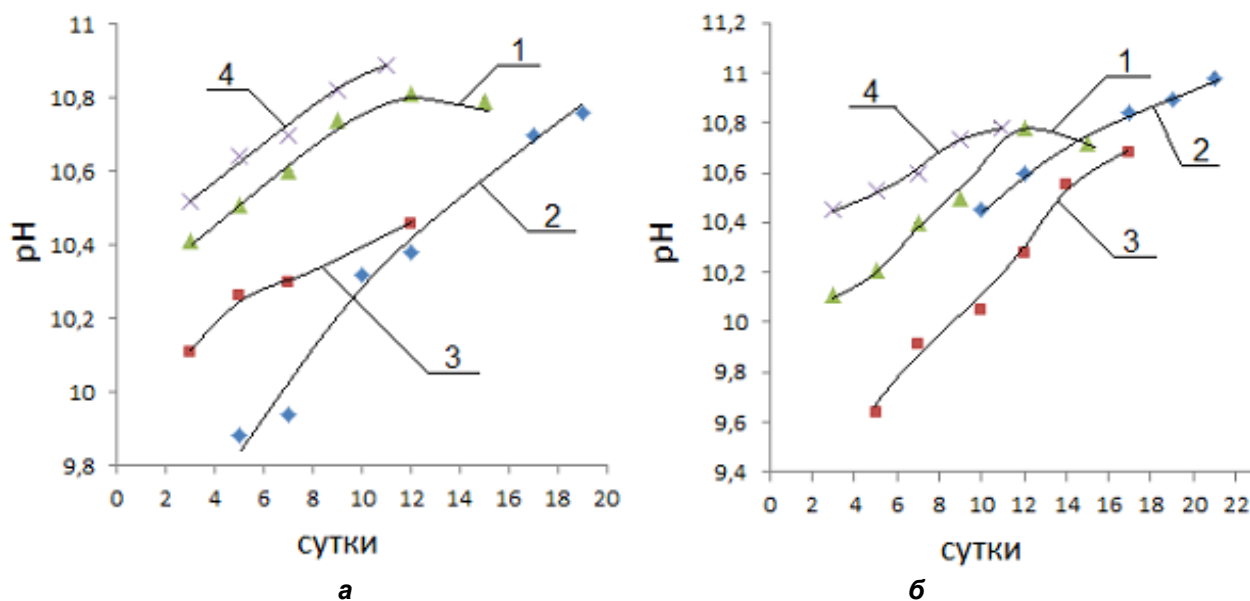


Рис. 2. Зависимость значений pH от времени экспозиции цинка при воздействии бактерий *Pseudomonas aeruginosa* (1), *Pseudomonas fluorescens* (2), *Bacillus subtilis* (3), *Clostridium spp.* (4): а – при культивировании на МПА; б – при культивировании на минеральной среде

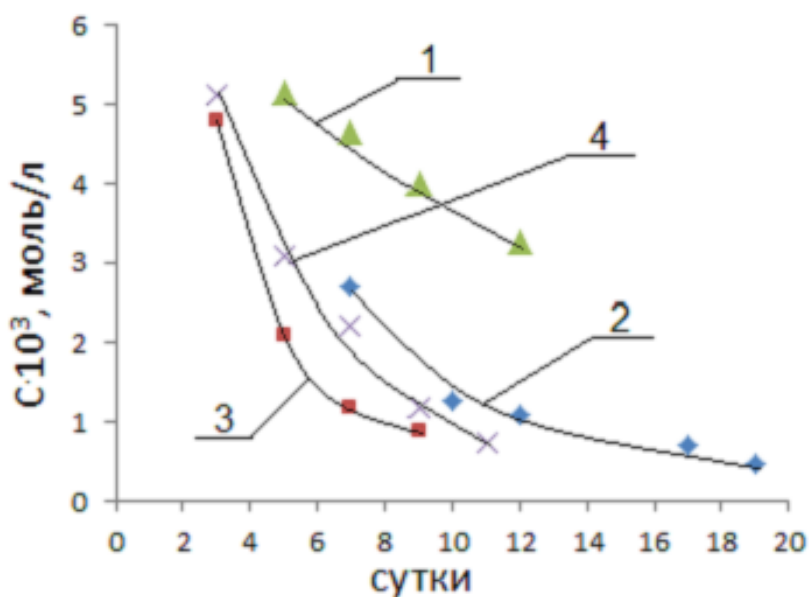


Рис. 3. Зависимость концентрации аммиака в экссудате на поверхности Цинка от времени экспозиции: 1 – *Pseudomonas aeruginosa*; 2 – *Pseudomonas fluorescens*; 3 – *Bacillus subtilis*; 4 – *Clostridium spp.*

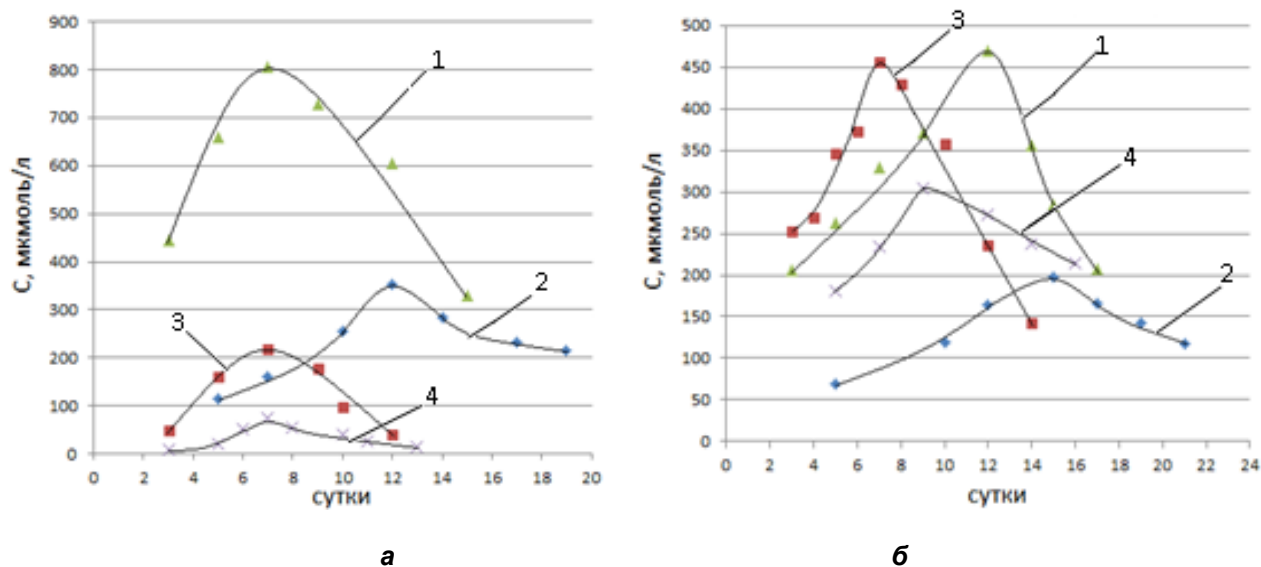


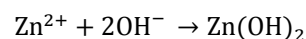
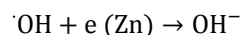
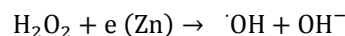
Рис. 4. Зависимость концентрации H₂O₂ в экссудате на поверхности цинка от времени экспозиции при воздействии *Pseudomonas aeruginosa* (1), *Pseudomonas fluorescens* (2), *Bacillus subtilis* (3), *Clostridium spp.* (4): а – при культивировании на МПА; б – при культивировании на минеральной среде

Однако из сравнения зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, видно, что к периоду, когда значение pH выходит на максимальное значение, концентрация аммиака в экссудате начинает заметно уменьшаться. При культивировании бактерий на глюкозо-минеральной среде, лишенной источника азота, аммиак в экссудате не обнаруживается, а характер изменения pH с течением времени такой же, как при использовании среды МПА.

В соответствии с целями работы и, учитывая основной характер экссудата, проведен его анализ на содержание пероксида водорода в динамике (рис. 4). На кинетику накопления пероксида водорода, как видно из рис. 4, влияет, на наш взгляд, строение мезосом, а соответственно, организация и эффективность электронного транспорта в целом. Так, у грамположительных бактерий *Clostridium spp.* и *Bacillus subtilis*, имеющих более развитую систему мезосом, при отсутствии органического азота как необходимого компонента для биосинтеза клеточного белка потребность в АТФ ограничена, что приводит к усилению процесса случайного переноса электронов на O₂ с образованием O₂⁻ и последующим превращением его в H₂O₂. В результате в остром опыте с участием бактерий *Clostridium spp.* в экссудате концентрация H₂O₂ почти в 6 раз выше, чем в условиях, благоприятных для жизнедеятельности бактерий. Противоположные закономерности наблюдаются при воздействии на цинк грамотрицательных бактерий, для которых характерна менее развитая, в сравнении с грам-

положительными бактериями, система мезосом (рис. 4).

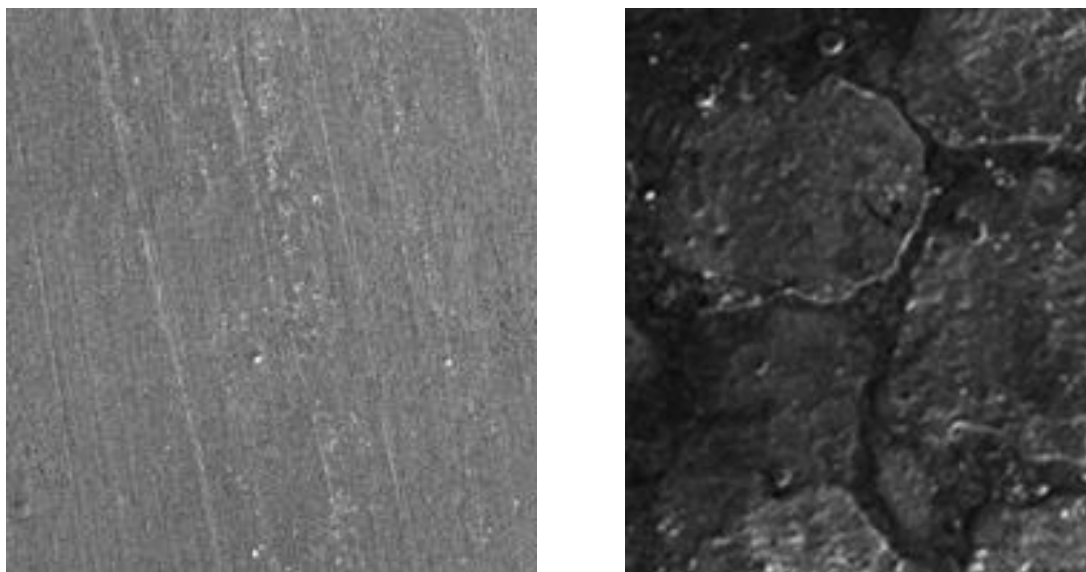
После разрушения оксидного слоя на поверхности цинка H₂O₂ может взаимодействовать непосредственно с металлом по реакциям, аналогичным реакции Фентона [21]:



Протекающие реакции поддерживают pH экссудата на высоком уровне в течение достаточно длительного времени экспозиции (рис. 2), в то время как концентрация H₂O₂ начинает снижаться (рис. 4). Так, для *Clostridium spp.*, культивируемой на глюкозо-минеральной питательной среде к 16 сут экспозиции концентрация H₂O₂ в экссудате снижается по сравнению с максимальной в 9 раз, а значение pH выходит на свой максимальный уровень.

Воздействие на цинк H₂O₂ и OH⁻, образующихся в результате жизнедеятельности бактерий, приводят к разрушению поверхности металла уже на ранних стадиях воздействия бактерий, когда очевидна их стимулирующая роль (рис. 5).

В свою очередь, образование продуктов биотрансформации кислорода зависит от ряда биогенных факторов – количества мезосом, дыхательной и общей метаболической активности, условий жизнедеятельности.



а

б

Рис. 5. Микрофотографии поверхности цинка: а – исходная поверхность цинка, не контактирующая с бактериями ($\times 1000$); б – поверхность цинка спустя 5 сут экспозиции под воздействием бактерий *Vacillus subtilis* ($\times 200$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что бактерии, культивируемые на плотной питательной среде, при контакте с поверхностью цинка способны выделять продукты биотрансформации кислорода H_2O_2 и OH^- . Моделирование условий жизнедеятельности бактерий показало, что одной из

главных причин образования пероксида водорода является организация электронотранспортной системы бактерий и сбалансированность метаболических процессов в дыхательной цепи. Выявление стимулирующих факторов дает возможность поиска направлений ингибирования биологической коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Javaherdashti R. Microbiologically Influenced Corrosion an Engineering Insight. UK: Springer-Verlag, 2008. 164 p.
2. Little B.J., Lee J.S. Microbiologically Influenced Corrosion. NJ: John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, 2007. 279 p.
3. Beech I.B. Biocorrosion: role of sulfate-reducing bacteria. Encyclopedia of environmental microbiology. New York: Wiley, 2002. P. 465–475.
4. Kip N., van Veen J. A. The dual role of microbes in corrosion // The International Society for Microbial Ecology Journal. 2014. N 9. P. 542–551. DOI: 10.1038/ismej.2014.169
5. Lewandowski Z., Beyenal H. Fundamentals in Biofilm Research. Second Edition. CRC Press, 2013. 614 p.
6. Герасименко А.А., Андрющенко Т.А. Защита меди от микробной коррозии в морских и приморских средах // Технология машиностроения. 2013. N 1. С. 39–44.
7. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Кузнецов Ю.И., Беленева И.А., Харченко У.В. Защита от морской коррозии сталей в замкнутых объемах // Коррозия: материалы, защита. 2013. N 5. С. 35–40.
8. Chang Y-J., Hung C-H., Lee J.W., Chang Y-T., Lin F-Y., Chuang C-J. A study of microbial population dynamics associated with corrosion rates influenced by corrosion control materials // International Biodeterioration & Biodegradation . 2015. N 102. P. 330–338. DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.03.008.
9. Lear G. (Editor) Microbial Biofilms: Current Research and Applications. Wymondham, Caister Academic Press, 2012. 228 p.
10. Schaule G., Griebe T., Flemming H.-C. Steps in biofilm sampling and characterization in biofouling cases // Microbiologically Influenced Corrosion of industrial materials. 1999. V. 157, N 1. P. 117–138.
11. Челнокова М.В., Белов Д.В., Калинина А.А., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Карташов В.Р. Активные формы кислорода в коррозии металлов // Коррозия: материалы, защита. 2011. N 3. С. 19–26.
12. Белов Д.В., Калинина А.А., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Челнокова М.В., Карташов В.Р. Роль супероксидного анион – радикала в

бактериальной коррозии металлов // Прикладная биохимия и микробиология. 2012. Т.48, N 3. С. 302.

13. Auchere F., Rusnak F. What is the ultimate fate of superoxide anion in vivo? // Journal of Biological Inorganic Chemistry. 2002. V. 6. P. 664–667. DOI: 10.1007/s00775-002-0362-2

14. Skulachev V.P. Biochemical mechanisms of evolution and the role of oxygen // Biochemistry-Moscow. 1998. V. 63, N 11. P. 1335–1343.

15. Bielski B.H.J., Cabelli D.E., Arudi R.L., Ross A.B. Reactivity of HO₂/O₂—Radicals in Aqueous Solution // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1985. V. 14, N 4. P. 1041–1100.

16. Allen A.O., Hochanadel C.J., Ghormley J.A., Davis T.W. Decomposition of water and aqueous solutions under mixed fast neutron and gamma radiation // Journal of Physical Chemistry. 1952. V. 56, N 5. P. 575–586. DOI: 10.1021/j150497a007.

17. Maruthamuthu S., Dhandapani P., Ponmariappan S., Bae Jeong-Hyo, Palaniswamy N., Pattanathu K.S.M. Rahman Impact of

Ammonia Producing Bacillus sp. on Corrosion of Cupronickel alloy 90:10 // Metals and Materials International. 2009. V. 15., N 3. P. 409–419. DOI: 10.1007/s12540-009-0409-9

18. Belov D.V., Sokolova T.N., Kuzina O.V., Kartashov V.R., Smirnov V.F., Kostyukova L.V. Corrosion of aluminum and its alloys under the effect of microscopic fungi // Protection of metals and physical chemistry of surfaces. 2008. V. 44, N 7. P. 737–742.

19. Smirnov V.F., Sokolova T.N., Belov D.V., Kuzina O.V., Kartashov V.R. Microbiological corrosion of aluminum alloys // Applied Biochemistry and Microbiology. 2008. V. 44, N 2. С. 192–196.

20. Белов Д.В., Челнокова М.В., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Карташов В.Р. О роли активных форм кислорода в иницировании коррозии металлов микроскопическими грибами // Коррозия: материалы, защита. 2009. N 11. С. 43–48.

21. Fenton H.J. Oxidation of tartaric acid in the presence of iron // Journal of the Chemical Society. 1894. V. 65. P. 899–910. DOI: 10.1039/ct8946500899.

REFERENCES

1. Javaherdashti R. *Microbiologically Influenced Corrosion an Engineering Insight*, Springer-Verlag, UK, 2008, 164 p.

2. Little B.J., Lee J.S. *Microbiologically Influenced Corrosion*, John Wiley & Sons. Inc., Hoboken., NJ, 2007, 279 p.

3. Beech I.B. *Biocorrosion: role of sulfate-reducing bacteria. Encyclopedia of environmental microbiology*. Wiley, New York, 2002, pp. 465–475.

4. Kip N., van Veen J.A. The dual role of microbes in corrosion. *The International Society for Microbial Ecology Journal*. 2014, no. 9, pp. 542–551. DOI: 10.1038/ismej.2014.169

5. Lewandowski Z., Beyenal H. *Fundamentals in Biofilm Research, Second Edition*, CRC Press, 2013, 614 p.

6. Gerasimenko A.A., Andryushchenko T.A. Protection of copper from microbial corrosion in marine and coastal environments. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Mechanical engineering Technology]. 2013, no. 1, pp. 39–44. (in Russian)

7. Karpov V.A., Kovalchuk Y.L., Kuznetsov Y.I., Beleneva I.A., Kharchenko U.V. Protection of marine corrosion of steel in confined spaces. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2013, no. 5, pp. 35–40. (in Russian)

8. Chang Y-J., Hung C-H., Lee J.W., Chang Y-T., Lin F-Y., Chuang C-J. A study of microbial population dynamics associated with corrosion rates influenced by corrosion control materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015, no. 102, pp. 330–338. DOI: 10.1016/

j.ibiod.2015.03.008.

9. Lear G. (editor) *Microbial Biofilms: Current Research and Applications*. Caister Academic Press, Wymondham, 2012, 228 p.

10. Schaule G., Griebe T., Flemming H.-C. Steps in biofilm sampling and characterization in biofouling cases. *Microbiologically Influenced Corrosion of industrial materials*. 1999, vol. 157, no. 1, pp. 117–138.

11. Chelnokova M.V., Belov D.V., Kalinina A.A., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Kartashov V.R. Active oxygen forms a metal corrosion. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2011, no. 3, pp. 19–26. (in Russian)

12. Belov D.V., Kalinina A.A., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Chelnokova M.V., Kartashov V.R. The role of superoxide anion - radical in bacterial corrosion of metals. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied Biochemistry and Microbiology]. 2012, vol. 48, no. 3, pp. 302. (in Russian)

13. Auchere F., Rusnak F. What is the ultimate fate of superoxide anion in vivo? *Journal of Biological Inorganic Chemistry*. 2002, vol. 6, pp. 664–667. DOI: 10.1007/s00775-002-0362-2.

14. Skulachev V.P. Biochemical mechanisms of evolution and the role of oxygen. *Biochemistry-Moscow*. 1998, vol. 63, no. 11, pp. 1335–1343.

15. Bielski B.H.J., Cabelli D.E., Arudi R.L., Ross A.B. Reactivity of HO₂/O₂—Radicals in Aqueous Solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1985, vol. 14, no. 4, pp. 1041–1100.

16. Allen A.O., Hochanadel C.J., Ghormley

J.A., Davis T.W. Decomposition of water and aqueous solutions under mixed fast neutron and gamma radiation. *Journal of Physical Chemistry*. 1952. V. 56, no 5. pp. 575–586. DOI:10.1021/j150497a007.

17. Maruthamuthu S., Dhandapani P., Ponmariappan S., Bae Jeong-Hyo, Palaniswamy N., Pattanathu K.S.M. Rahman Impact of Ammonia Producing Bacillus sp. on Corrosion of Cupronickel alloy 90:10. *Metals and Materials International*. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 409–419. DOI: 10.1007/s12540-009-0409-9.

18. Belov D.V., Sokolova T.N., Kuzina O.V., Kartashov V.R., Smirnov V.F., Kostyukova L.V. Corrosion of aluminum and its alloys under the effect of microscopic fungi. *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. 2008, vol. 44,

no. 7, pp. 737–742.

19. Smirnov V.F., Sokolova T.N., Belov D.V., Kuzina O.V., Kartashov V.R. Microbiological corrosion of aluminum alloys. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2008, vol. 44, no. 2, pp. 192–196.

20. Belov D.V., Chelnokova M.V., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Kartashov V.R. The role of reactive oxygen species in the initiation of corrosion of metals by microscopic fungi. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2009, no. 11, pp. 43–48. (in Russian)

21. Fenton H.J. Oxidation of tartaric acid in the presence of iron. *Journal of the Chemical Society*. 1894, vol. 65, pp. 899–910. DOI:10.1039/ct8946500899.

Критерии авторства

Калинина А.А., Радостин С.Ю., Мakedoshin А.С., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф., Карташов В.Р. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Сидорова Н.А., Трофимова С.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ **Принадлежность к организации**

Александра А. Калинина
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
К.х.н., доцент
777aleksa777_87@mail.ru

Станислав Ю. Радостин
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
К.х.н., доцент
biotehno@nntu.nnov.ru

Александр С. Мakedoshin
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Аспирант
biotehno@nntu.nnov.ru

Татьяна Н. Соколова
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Д.х.н., профессор

Contribution

Kalinina A.A., Radostin S.Y., Makedoshin A.S., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Kartashov V.R. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Kalinina A.A., Radostin S.Y., Makedoshin A.S., Sokolova T.N., Smirnov V.F., Kartashov V.R. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

AUTHORS' INDEX **Affiliation**

Aleksandra A. Kalinina
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,
Ph.D. (Chemistry), Associate Professor
777aleksa777_87@mail.ru

Stanislav Y. Radostin
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,
Ph.D. (Chemistry), Associate Professor
biotehno@nntu.nnov.ru

Aleksandr S. Makedoshin
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,
Postgraduate Student
biotehno@nntu.nnov.ru

Tatyana N. Sokolova
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,
Doctor of Chemistry, Professor, Professor

biotechno@nntu.nnov.ru

Василий Ф. Смирнов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Д.б.н., профессор
biotechno@nntu.nnov.ru

Виктор Р. Карташов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Д.х.н., профессор,
biotechno@nntu.nnov.ru

biotechno@nntu.nnov.ru

Vasilii F. Smirnov

Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,
Doctor of Biology, Professor, Professor
biotechno@nntu.nnov.ru

Victor R. Kartashov

Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R.E. Alekseev,

Doctor of Chemistry, Professor,
Professor biotechno@nntu.nnov.ru

Поступила 28.11.2016

Received 28.11.2016