



### Дорогие друзья!

*В детстве от нового года ждешь чуда, с  
возрастом надежда на чудо несколько ос-  
лабеваает, больше хочется спокойствия  
и стабильности.*

*Хорошо бы именно таким стал новый год  
– мирным и спокойным.*

*С Новым годом, дорогие друзья, успехов и  
благополучия Вам и Вашим семьям.*



### Дорогие коллеги,

Тематика статей новогоднего номера журнала весьма разнообразна – от статьи Н.Г. Ануфриева и Ю.А. Кузенкова о коррозионных натурных испытаниях в тропических условиях до использования просроченных лекарств в качестве ингибиторов коррозии (статья Л.Е. Цыганковой, В.А. Брыксиной, О.А. Алехиной, Н.В. Шель). На наш взгляд, существенный практический и научный интерес представляет статьи В.С. Сучкова, С.Н. Степина, О.П. Кузнецовой, М.С. Давыдовой, И.Г. Москвина, Г.Р. Залялютдиновой о путях улучшения эксплуатационных и противокоррозионных параметров огнезащитных составов и Б.Н. Дрикера, Н.В. Цирульниковой, А.А. Протазанова, Н.Н. Стягова, посвященная ингибиторам солеотложения и коррозии. Весьма актуальна статья М.Б. Рыспаевой, Р.М. Нурисламова, А.Н. Нефедова, М.Ж. Журинова о процессах эрозионно-коррозионного разрушения оборудования нефтепереработки. В этом номере мы публикуем также первую часть фундаментального обзора Д.В. Белова и С.Н. Беляева по микробиологической коррозии.

Редакция журнала





**ПРАКТИКА  
ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Том 27 № 4 2022 г.

ISSN 1998-5738 (Print)  
ISSN 2658-6797 (Online)

Выходит 4 раза в год  
Издается с 1996 года

Объединенный каталог «Пресса  
России»  
– индекс 87750, 88009

Учредитель  
ООО «КАРТЭК»

Издатель  
ООО «КАРТЭК»

Зарегистрирован Комитетом  
Российской Федерации по печати

Свидетельство № 015777  
от 26.02.1997 г.

Адрес Издателя:  
Москва, Ленинский проспект,  
дом 29, стр. 2  
Почтовый адрес:  
119071 г. Москва, а/я 64  
Тел. (985) 776-10-21  
E-mail: [cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)  
<http://www.corrosion-protection.ru>

© журнал «Практика  
противокоррозионной защиты»

**Редакционная коллегия**

**АКОЛЬЗИН Андрей Павлович** (главный редактор),  
доктор технических наук, профессор, Генеральный директор  
ООО «КАРТЭК», г. Москва, Российская Федерация

**ПОЛЯКОВ Николай Анатольевич** (зам. главного  
редактора), кандидат химических наук, директор АНО  
«ЦНИИКС», заведующий лабораторией Института  
физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина  
РАН, г. Москва, Российская Федерация

**АБРАШОВ Алексей Александрович**, кандидат технических  
наук, доцент Российского химико-технологического  
университета имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская  
Федерация

**АНДРЕЕВ Николай Николаевич**, доктор химических наук,  
заведующий лабораторией Института физической химии  
и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,  
Российская Федерация

**АНУФРИЕВ Николай Геннадиевич**, кандидат химических  
наук, ведущий научный сотрудник Института физической  
химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва,  
Российская Федерация

**ГРОЙСМАН Алик**, кандидат химических наук, председатель  
Ассоциации инженеров-химиков и химиков Израиля, г. Тель-  
Авив, Израиль; профессор Израильского технологического  
института Технион, г. Хайфа, Израиль

**КАЛУЖИНА Светлана Анатольевна**, доктор химических  
наук, профессор Химического факультета Воронежского  
государственного университета, г. Воронеж, Российская  
Федерация

**МИНЕЕВА Надежда Яковлевна**, доктор географических  
наук, профессор Государственного университета по  
землеустройству, г. Москва, Российская Федерация

**РЕФОРМАТСКАЯ Ирина Игоревна**, доктор химических наук,  
профессор Академии Государственной противопожарной  
службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

**ТИМОНИН Виктор Алексеевич**, доктор химических  
наук, профессор Российского химико-технологического  
университета имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская  
Федерация

**ЩЕРБИНА Анна Анатольевна**, доктор химических наук,  
проректор по науке Российского химико-технологического  
университета имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская  
Федерация

**ФАМ Зуи Нам**, кандидат химических наук, Заместитель  
Генерального директора по науке Российско-Вьетнамского  
Тропического научно-исследовательского и технологического  
центра (Тропический центр), г. Ханой, Вьетнам

**Заведующая редакцией**

**АКОЛЬЗИНА Алла Викторовна**, кандидат технических наук,  
ООО «КАРТЭК»

**Выпускающий редактор**

**НАРКЕВИЧ Екатерина Николаевна**

**Технический редактор**

**ГЛУХОВ Вячеслав Геннадьевич**



**THEORY AND PRACTICE OF  
CORROSION PROTECTION**

**Volume 27 Issue 4 2022**

**ISSN 1998-5738 (Print)  
ISSN 2658-6797 (Online)**

**4 issues per year  
Published 1996 – present**

**“Press of Russia” United Catalogue  
– indices 87750, 88009**

**Founder  
CARTEC, LLC**

**Publisher  
CARTEC, LLC**

Registered by Press Committee of the  
Russian Federation

License No. 015777  
issued 26.02.1997

Address of the Publisher:  
build. 2, 29, Leninskii av.,  
Moscow, Russian Federation  
Postal address:  
PO Box 64, Moscow, 119071 Russian  
Federation  
Tel.: +7(985) 776-10-21  
E-mail: [cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)  
<http://www.corrosion-protection.ru>

© “Theory and Practice of Corrosion  
Protection”, journal

**Editorial Board**

**Andrey P. AKOL’ZIN (editor-in-chief)**,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, CEO of CARTEC, LLC,  
Moscow, Russian Federation

**Nikolay A. POLYAKOV (deputy editor-in-chief)**, Ph.D. in  
Chemistry, Director of Independent Non-Profit Organization  
“Central Research Institute for Corrosion and Certification”,  
Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and  
Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian  
Federation

**Alexey A. ABRASHOV**, Ph.D. in Technical Sciences, assistant  
professor, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of  
Russia, Moscow, Russian Federation

**Nikolay N. ANDREEV**, Doctor of Chemistry, Head of Laboratory,  
Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Nikolay G. ANUFRIEV**, Ph.D. in Chemistry, leading researcher,  
Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Alec GROYSMAN**, Ph.D. in Physical Chemistry and Corrosion,  
chairman of the Israel Association of Chemical Engineers and  
Chemists, Tel Aviv, Israel; Technion (Israel Institute of Technology),  
Haifa, Israel

**Svetlana A. KALUZHINA**, Doctor of Chemistry, Professor of  
Chemical Faculty of Voronezh State University, Voronezh, Russian  
Federation

**Nadezhda Ya. MINEEVA**, Doctor of Geography, Professor, State  
University of Land Use Planning, Moscow, Russian Federation

**Irina I. REFORMATSKAYA**, Doctor of Chemistry, Professor,  
Academy of the State Fire Service, EMERCOM of Russia, Moscow,  
Russian Federation

**Viktor A. TIMONIN**, Doctor of Chemistry, Professor, Dmitry  
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow,  
Russian Federation

**Anna A. SHCHERBINA**, Doctor of Chemistry, Vice Rector in  
Science, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of  
Russia, Moscow, Russian Federation

**Duy Nam PHAM**, Ph.D. in Chemistry, Deputy General Director for  
science, Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology  
Centre, Hanoi, Vietnam

**Managing Editor**

**Alla V. AKOL’ZINA**, Ph.D. in Technical Sciences, CARTEC, LLC

**Copy Editor**

**Ekaterina N. NARKEVICH**

**Setting and Design**

**Vycheslav G. GLUKHOV**



**В номере:**

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОРРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ**

Н.Г. Ануфриев, Ю.А. Кузенков

Коррозивность тропической атмосферы Южного Вьетнама..... 7

**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

В.С. Сучков, С.Н. Степин, О.П. Кузнецова, М.С. Давыдова, И.Г. Москвин,  
Г.Р. Залялютдинова

Улучшение эксплуатационных и противокоррозионных свойств пленко-  
образующей основы грунтовок для огнезащитных покрытий..... 19

Б.Н. Дрикер, Н.В. Цирульникова, А.А. Протазанов, Н.Н. Стягов

Ингибиторы солеотложений и коррозии на основе органофосфонатов..... 26

Л.Е. Цыганкова, В.А. Брыксина, О.А. Алехина, Н.В. Шель

Защитная эффективность омепразола против сероводородной коррозии  
углеродистой стали..... 36

**ОБОРУДОВАНИЕ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ – КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА**

М.Б. Рыспаева, Р.М. Нурисламов, А.Н. Нефедов, М.Ж. Журинов

Моделирование эрозионного износа регулирующего клапана Fisher V500  
линии подачи суспензии установки каталитического крекинга нефтяных  
остатков..... 45

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ – ОБЩИЕ ВОПРОСЫ**

Д.В. Белов, С.Н. Беляев

Об определяющей роли биопленок микроорганизмов в иницировании и  
развитии микробиологической коррозии металлов (часть 1)..... 52

**СЕРТИФИКАЦИЯ**..... 68

**ВНИМАНИЮ АВТОРОВ**

Информация по подготовке статей размещена на сайте:  
<http://www.corrosion-protection.ru>.





**Contents:**

**DEVICES AND METHODS OF CORROSION CONTROL**

N.G. Anufriev, Yu. A. Kuzenkov

Corrosivity of the tropical atmosphere of South Vietnam.....	7
--	---

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR CORROSION PROTECTION**

V.S. Suchkov, S.N. Stepin, O.P. Kuznetsova, M.S. Davydova, I.G. Moskvina,  
G.R. Zalyalyutdinova

Improving the operational and anticorrosive properties of the film-forming base of primers for fire-retardant coatings.....	19
--	----

B.N. Driker, N.V. Tsiurlikova, A.A. Protazanov, N.N. Styagov

Salt deposition and corrosion inhibitors based on organophosphonates.....	26
---	----

L.E. Tsygankova, V.A. Bryksina, O.V. Alekhina, N.V. Shel

Protective efficacy of omeprazole against hydrogen sulfide corrosion of carbon steel.....	36
--	----

**EQUIPMENT FOR OIL AND GAS PRODUCTION AND OIL AND GAS  
PROCESSING – CORROSION AND PROTECTION**

M.B. Ryspayeva, R.M. Nurislamov, A.N. Nefedov, M.Zh. Zhurnov

Computational modeling of erosion wear of the Fisher V500 control valve of the slurry supply line of the catalytic cracking facility of oil residues.....	45
--	----

**CORROSION AND PROTECTION AGAINST CORROSION – GENERAL ISSUE**

D.V. Belov, S.N. Belyaev

On the decisive role of biofilms of microorganisms in the initiation and development of microbiological corrosion of metals (part 1).....	52
--	----

<b><u>SERTIFICATION</u></b> .....	68
-----------------------------------	----


**ATTENTION TO AUTHORS**

Information on the preparation of articles is posted on the website:  
<http://www.corrosion-protection.ru>.



**Уважаемые коллеги, дорогие друзья!**

**Наступающий год – год черного водяного кролика.**

Есть журналы, которые используют изображения кроликов в своем оформлении ,  
но лишь наш журнал всецело посвящен вопросам защиты от коррозии.

**Не ошибитесь с выбором!**

**Подписка на журнал «Практика противокоррозионной защиты»  
на 2023 год продолжается!**

## **Подписка на 2023 год продолжается!**

*Уважаемые коллеги!*

Мы были бы рады видеть Вас в числе подписчиков журнала «Практика противокоррозионной защиты». Подписаться на журнал можно во всех отделениях связи России и стран СНГ:

- объединенный каталог «Пресса России»  
– индекс 87750, 88009.

Стоимость годовой подписки печатной версии – 6600 рублей, в том числе НДС (10%). Подписная цена включает стоимость доставки.

Стоимость электронной версии журнала – 6600 рублей, в том числе НДС (20%).

Вы также можете оформить подписку в редакции, для этого позвоните по телефону (985) 776-10-21.

**Просим обратить внимание, что стоимость подписки на электронную версию журнала снижена.**



**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ  
КОРРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ**

**DEVICES AND METHODS  
OF CORROSION CONTROL**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-1

**Коррозивность тропической атмосферы Южного Вьетнама**

**Н.Г. Ануфриев<sup>✉</sup>, Ю.А. Кузенков**

Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,  
РФ, 119071 Москва, Ленинский проспект, д. 31, к. 4

*e-mail: anufrievng@mail.ru*

**Аннотация.** По результатам годовых коррозионных испытаний на КИС Кон Зо Южного отделения Тропического центра в г. Хошимине (СРВ) определены скорости атмосферной коррозии стали, меди, цинка и алюминия. Дана оценка коррозивности атмосферы КИС Кон Зо по отношению к каждому металлу по методике международного стандарта ISO 9223:2012 (Е). С использованием функций доза-ответ (ФДО) рассчитаны скорости коррозии этих металлов за первый год ( $K_1$ ) по метеорологическим и аэрохимическим параметрам атмосферы. Получена удовлетворительная корреляция наблюдаемых и расчетных величин для стали, меди и алюминия. Это свидетельствует о возможности применения ФДО международного стандарта для оценки величин  $K_1$  и категорий коррозионной агрессивности районов Вьетнама.

**Ключевые слова:** коррозивность, тропическая атмосфера, алюминий, сталь углеродистая, медь, цинк, натурные испытания, функции доза-ответ.

**Для цитирования:** Ануфриев Н.Г., Кузенков Ю.А. Коррозивность тропической атмосферы Южного Вьетнама // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 7-18. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-1

*Статья получена: 20.06.2022, опубликована 01.12.2022.*

**Corrosivity of the tropical atmosphere of South Vietnam**

**N.G. Anufriev<sup>✉</sup>, Yu. A. Kuzenkov**

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,  
bld. 4, 31, Leninskii prospect, Moscow, 119071, Russia

*e-mail: anufrievng@mail.ru*

**Abstract.** Based on the results of annual corrosion tests at Kon Zo corrosion station, the southern branch of the Tropical Center in Ho Chi Minh City (Vietnam) determined the atmospheric corrosion rates of steel, copper, zinc, and aluminium. The corrosivity of atmosphere of Kon Zo corrosion station assessed in to relation to each metal according to the Methodology of international standard ISO 9223:2012 (E). Using Dose-Response Functions (DRF) the corrosion rates of these metals for the first year ( $K_1$ ) were calculated with use of meteorological and aerochemical parameters of the atmosphere. A satisfactory correlation between the observed and calculated values for steel, copper and aluminium obtained. This indicates the possibility of using the DRF of international standard for determination the values  $K_1$  and corrosivity categories in areas of Vietnam.

**Keywords:** corrosivity, tropical atmosphere, aluminium, carbon steel, copper, zinc, full-scale tests, dose-response functions.

**For citation:** Anufriev, N. G., Kuzenkov, Yu. A. (2022). Corrosivity of the tropical atmosphere of South Vietnam. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(4), 7-18. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-1

*Received: June 20, 2022. Published: December 01, 2022.*

**Введение**

Зоны с тропическим климатом занимают более половины территории земного шара. В них эксплуатируется огромное количество техники, оборудования, большое количество металла используется в инфраструктуре. Это приводит к необходимости оценки коррозионной агрессивности атмосферы различных районов, в том числе районов Южного Вьетнама с влажным тропическим

климатом. Ранее в работе [1] была представлена коррозионная стойкость углеродистой стали Ст3, цинка, меди, алюминия, латуни и коррозионностойких сплавов для некоторых районов Вьетнама, дан анализ процессов коррозии, происходящих на металлах.

В последние десятилетия произошло значительное развитие науки о коррозии, разработаны новые модели оценки корро-



зионных потерь металлов за первый год ( $K_f$ ) по метеорологическим и аэрохимическим параметрам атмосферы – функции доза-ответ (ФДО) [2, 3]. Эти ФДО позволяют рассчитывать  $K_f$  по среднегодовым многолетним параметрам агрессивности атмосферы в любом климатическом районе мира без проведения многочисленных одногодичных коррозионных испытаний. Величина  $K_f$  является важным параметром, так как это не только коррозионные потери за первый год, но и характеристика атмосферы при определении категории коррозивности атмосферы по отношению к каждому металлу.

В работе [4] приведены результаты определения скорости коррозии углеродистой стали, меди, цинка, алюминия в различных районах Вьетнама и в соответствии с ISO 9223:2012 (E), дана оценка степени коррозивности атмосферы двух климатических станций Тропического центра коррозионно-испытательной станции (КИС) Хоа Лак и Международной научно-исследовательской испытательной станции Дам Бай и восьми представительных зон Вьетнама.

Настоящая работа является логическим продолжением исследований влияния различных факторов окружающей среды на коррозию на климатической станции Тропического центра, введенной в строй в 2012 г. – КИС Кон Зо.

Целью данной работы является определение коррозионных потерь алюминия, углеродистой стали, меди и цинка за первый год испытаний на КИС Кон Зо, оценка категории коррозивности атмосферы КИС Кон Зо по отношению к каждому металлу, а также проверка возможности применения ФДО, представленных в международном стандарте [2], для расчета величин  $K_f$ .

## 1. Методика работ

### 1.1 Методика проведения испытаний

Натурные коррозионные испытания проведены в соответствии с [5] в течение года на КИС Кон Зо Южного отделения Тропического центра в г. Хошимине (СРВ). Объектами испытаний являлись пластины, изготовленные из алюминия первичного марки А5, стали СтЗпс, меди МЗ и цинка Ц0А. Испытывались по три



Рис. 1. Внешний вид станда с образцами для определения коррозивности атмосферы КИС Кон Зо после постановки на натурные испытания

Fig. 1. Appearance of the stand with metal samples for corrosivity of atmosphere of Kon Zo corrosion station determination after setting up to full-scale tests



одинаковых образца  $100 \times 150 \times (1...2)$  мм.

Подготовка образцов к испытаниям осуществлялась согласно [5, 6]. Перед постановкой на испытания образцы обезжиривали в этиловом спирте. Образцы устанавливались в открытой атмосфере на стендах, ориентированных верхней стороной (сторона, обращенная к небу) на север под углом  $45^\circ$  к горизонту. Образцы фиксировали на раме, как показано на рис. 1. По истечении 12 мес. натурных испытаний образцы были сняты с экспозиции для определения потерь массы в лабораторных условиях.

Одновременно с испытаниями проводилась непрерывная регистрация климатических параметров. Для этого применялась автоматическая метеостанция Vantage Pro2 (Davis Instruments, США). Метеорологические параметры: температура ( $T$ ) и относительная влажность воздуха ( $RH$ ) регистрировались ежечасно, и усреднялись за период наблюдений. Определение аэрохимических параметров – загрязненности атмосферы сернистым газом и засоленности атмосферы проводили ежемесячно, результаты также усреднялись. Концентрацию сернистого газа и седиментацию хлоридов определяли согласно [7].

## 1.2 Методика определения коррозионных потерь

После экспозиции образцы высушивали в эксикаторе в течение 24 ч, взвешивали, далее продукты коррозии снимали сочетанием механической и химической очистки с использованием соответствующих растворителей. После сушки и трехкратного взвешивания каждого образца с точностью до  $0,0001$  г определялась его средняя масса. Химическое травление осуществлялось в несколько этапов следующим образом: металлические образцы каждой марки помещали по одному в соответствующий травильный раствор на  $1...2$  минуты (в зависимости от типа металла и количества оксидов на его поверхности), затем пластины вынимали из раствора, промывали водопроводной водой, потом дистиллированной водой, протирали спиртом, сушили с использованием динамического метода осушения и взвешивали, после чего операция травления повторялась. Периоди-

ческое травление металла заканчивалось тогда, когда разница веса образца между тремя последними травлениями составляла не более  $10...20$  мг или потеря массы образца за три последних травления была значительно меньше, чем при первом взвешивании. Травление металлических образцов проводилось в следующих растворах согласно [8, 9]:

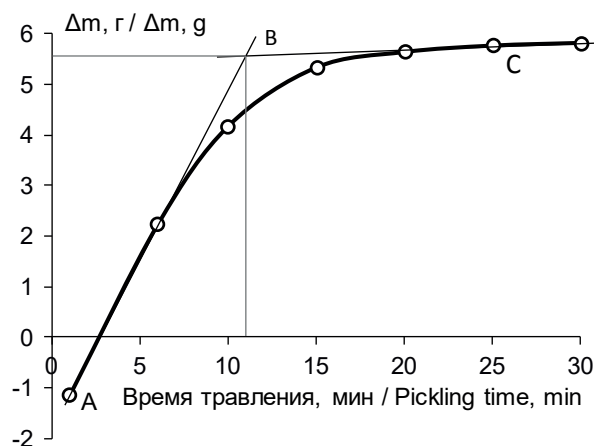
- стали СтЗпс – в растворе, содержащем  $500$  мл/л  $HCl$  ( $\rho = 1,19$  г/мл) и  $3,5$  г/л уротропина при  $25^\circ C$ ;

- цинка Ц0А – в растворе, содержащем  $200$  г/л  $CrO_3$  при  $80^\circ C$ ;

- меди МЗ – в растворе, содержащем  $500$  мл/л  $HCl$  ( $\rho = 1,19$  г/мл) при  $25^\circ C$ ;

- алюминия А5 – при температуре  $80 \pm 1^\circ C$  в растворе, содержащем  $50$  мл/л  $H_3PO_4$  ( $\rho = 1,69$  г/мл) и  $20$  г/л  $CrO_3$  при  $80 \pm 1^\circ C$ .

Из полученных данных строили зависимости потери массы образца от числа циклов его травления. Типичная зависимость для травления СтЗпс приведена на рис. 2. Во всех случаях имела место линейная зависимость (ABC) с точкой перегиба (B). Линия (AB) характеризовала удаление продуктов коррозии, другая (BC) характеризовала динамику удаления основного металла после



**Рис. 2. Потеря массы образца из СтЗпс в зависимости от времени травления в растворе, содержащем  $500$  мл/л  $HCl$  ( $\rho = 1,19$  г/мл) и  $3,5$  г/л уротропина при  $25^\circ C$**   
**Fig. 2. The mass loss of the St3ps sample depends on the etching time in solution of  $500$  ml/l  $HCl$  ( $\rho = 1,19$  g/ml) and  $3,5$  g/l urotropin at  $25^\circ C$**

того, как удалены продукты коррозии. Экстраполяцией линии ВС на ось ординат получали точку, которая характеризовала потерю массы образца за счет коррозии (В) [9, с. 3]. Аналогичные зависимости были получены для алюминия А5, меди М3 и цинка Ц0А, по которым определялась среднегодовая скорость коррозии металлов во влажной тропической атмосфере.

Полученные значения среднегодовой коррозионной потери массы образцов пересчитывались на величину среднегодовой скорости коррозии металла ( $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$ ) с учётом площади обеих поверхностей образца, в том числе торцевых ( $0,033 \text{ м}^2$ ).

### 1.3 Математические модели, используемые для предсказания коррозионных потерь металлов за первый год ( $K_I^{np}$ )

Коррозионные потери металлов за первый год рассчитывали с помощью ФДО [2, 3], разработанных для любых регионов мира для 2-х температурных интервалов:  $T \leq 10^\circ \text{C}$  и  $T > 10^\circ \text{C}$ .

Для углеродистой стали ФДО представлена уравнением 1:

$$K_{St} = 1,77[SO_2]^{0,52} \cdot \exp(0,020RH + f_{St}) + 0,102[Cl^-]^{0,62} \cdot \exp(0,033RH + 0,040T), \quad (1)$$

$$f_{St} = 0,150(T - 50) \text{ при } T \leq 10^\circ \text{C};$$

при  $T > 10^\circ \text{C}$  –  $0,054(T - 10)$ .

Для цинка – уравнением 2:

$$K_{Zn} = 0,012[SO_2]^{0,44} \cdot \exp(0,046RH + f_{Zn}) + 0,0175[Cl^-]^{0,57} \cdot \exp(0,008RH + 0,085T), \quad (2)$$

$$f_{Zn} = 0,038(T - 10) \text{ при } T \leq 10^\circ \text{C};$$

при  $T > 10^\circ \text{C}$  –  $0,071(T - 10)$ .

Для меди – уравнением 3:

$$K_{Cu} = 0,005[SO_2]^{0,26} \cdot \exp(0,059RH + f_{Cu}) + 0,01025[Cl^-]^{0,27} \cdot \exp(0,036RH + 0,049T), \quad (3)$$

$$f_{Cu} = 0,126(T - 10) \text{ при } T \leq 10^\circ \text{C};$$

при  $T > 10^\circ \text{C}$  –  $0,080(T - 10)$ .

Для алюминия – уравнением 4:

$$K_{Al} = 0,004[SO_2]^{0,73} \cdot \exp(0,025RH + f_{Al}) + 0,018[Cl^-]^{0,60} \cdot \exp(0,020RH + 0,094T), \quad (4)$$

$$f_{Al} = 0,009(T - 10) \text{ при } T \leq 10^\circ \text{C};$$

$$\text{при } T > 10^\circ \text{C} - 0,043(T - 10),$$

где  $K_{Sp}$ ,  $K_{Zn}$ ,  $K_{Cu}$  и  $K_{Al}$  – скорость коррозии, оцененная за первый год атмосферного воздействия,  $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$ ;  $f_{Sp}$ ,  $f_{Zn}$ ,  $f_{Cu}$  и  $f_{Al}$  эмпирические функции температуры воздуха;

$T$  – среднегодовая температура воздуха,  $^\circ \text{C}$ ;  $RH$  – среднегодовая относительная влажность воздуха, %;

$[SO_2]$  и  $[Cl^-]$  – среднегодовое осаждение сернистого газа и хлоридов,  $\text{мг/м}^2\cdot\text{сут}$ .

## 2. Результаты исследований

### 2.1 Общая характеристика исследовательских работ на КИС Кон Зо

На КИС Кон Зо Тропического центра проводятся следующие виды испытаний и работ:

- определение коррозионной стойкости различных металлов, штатных и перспективных сплавов на их основе, климатической стойкости и защитной способности средств антикоррозионной защиты;

- определение стойкости неметаллических материалов к климатическому старению и микробиологической стойкости материалов, эффективности средств и методов их защиты от старения и биологических повреждений;

- определение климатической стойкости изделий в условиях, имитирующих эксплуатационные;

- апробирование новых перспективных методов консервации и хранения материалов и технических изделий в условиях влажного тропического климата;

- исследование изменения во времени состояния и свойств материалов, обоснование их выбора и средств защиты от коррозии, старения, биоповреждений (КСБ) в условиях тропического климата;

- мониторинг коррозионной агрессивности атмосферы с использованием образцов стандартных металлов, перспективных и применяемых в настоящее время сплавов, получение параметров окружающей среды

мест натурных испытаний;

- метеорологических наблюдений и их обработка;

- создание базы данных по КСБ основных конструкционных материалов в условиях влажного тропического климата.

## 2.2 Климатические и аэрохимические характеристики КИС Кон Зо

Климатическая испытательная станция Кон Зо Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра является представительным местом испытаний по климатическим и аэрохимическим параметрам для Южного Вьетнама. Она расположена в зоне мангровых лесов примерно в 40 км южнее г. Хошимина, 10°27'19" северной широты, 106°53'33" восточной долготы. Удаленность от моря примерно 18 км. Высота над уровнем моря 12 м. Район по климатическому признаку: тропический влажный, характерный для приморской зоны Южного Вьетнама. Среднегодовые данные метеорологических наблюдений на КИС Кон Зо за период испытания в 2016 г.:

- среднегодовая температура воздуха  $28,0 \pm 0,7$  °C;
- среднегодовая минимальная температура воздуха  $24,8 \pm 1,1$  °C;
- среднегодовая максимальная температура воздуха  $33,2 \pm 0,9$  °C;
- среднегодовая относительная влажность воздуха  $79,9 \pm 4,6\%$ ;
- среднегодовая минимальная влажность воздуха  $61,2 \pm 7,0\%$ ;
- среднегодовая максимальная влажность воздуха  $91,3 \pm 2,9\%$ ;
- среднегодовое количество выпадающих осадков  $2024,3 \pm 135,0$  мм /год;
- среднегодовое значение суммарной солнечной радиации  $5779 \pm 882,9$  МДж/м<sup>2</sup> год;
- скорость выпадения хлоридов  $12,22 \pm 1,38$  мг/(м<sup>2</sup>·сут);
- скорость выпадения  $SO_2$   $5,58 \pm 0,74$  мг/(м<sup>2</sup>·сут).

Как видно из приведенных данных, КИС Кон Зо за период испытания в 2016 г. характеризуется высокой среднегодовой температурой –  $28 \pm 0,7$  °C и относительной влажностью –  $79,9 \pm 4,6\%$ . Суммарная солнечная радиация составила  $5779 \pm 882,9$  МДж/м<sup>2</sup>, что примерно в 1,6 раза выше, чем в сред-

ней полосе России (в Москве 3670 МДж/м<sup>2</sup>). Среднегодовое количество осадков составило  $2024 \pm 135$  мм/год (в Москве около 860 мм/год). Основное количество осадков выпадает во втором полугодии (влажный сезон).

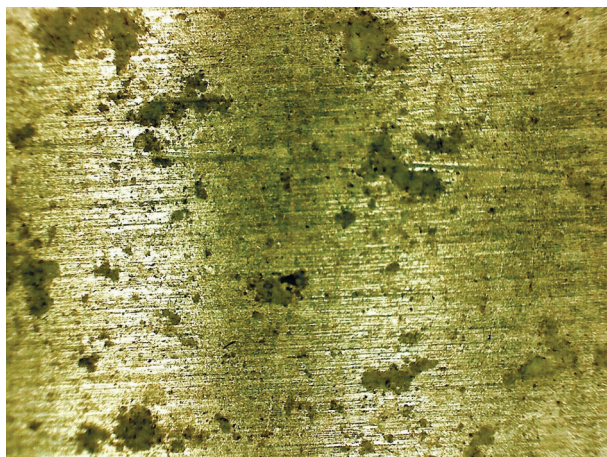
## 2.3 Коррозионное состояние и гравиметрические характеристики металлов после испытаний

**Алюминий А5.** После 12 мес. экспозиции верхняя сторона алюминия А5 покрылась белыми пятнами малорастворимых продуктов коррозии алюминия диаметром 0,5...1 мм в количестве 15...30 шт/см<sup>2</sup>. Рыхлые загрязненные продукты коррозии алюминия полностью удалялись после травления, при этом выявлялись неглубокие питтинги и пятна, на нижней стороне пятен и питтингов значительно меньше (рис. 3). Средняя масса пластин А5 после коррозионных испытаний увеличилась на 69,6 мг. Средняя потеря массы пластин после травления относительно их массы до коррозионных испытаний составила 38,61 мг, среднегодовая скорость коррозии алюминия А5 –  $1,17 \pm 0,06$  г/(м<sup>2</sup>·год).

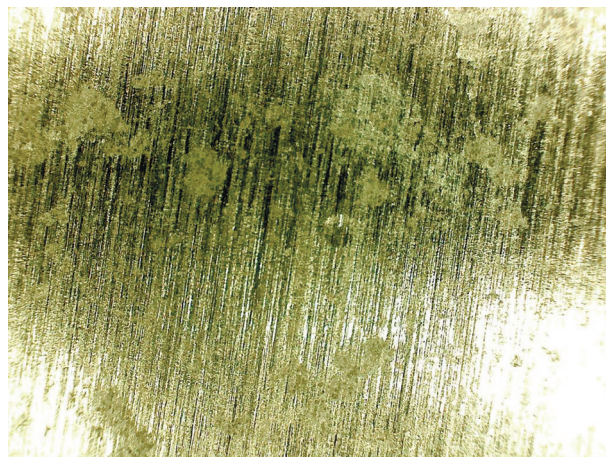
**Сталь Ст3пс.** Верхняя сторона стальных пластин стали Ст3пс после 12 мес. экспозиции была покрыта темным красно-коричневым слоем продуктов коррозии, с пятнами рыхлой ржавчины. Нижняя сторона – более светлая, с меньшей пятнистостью. Очевидно, это свидетельствует о меньшей скорости коррозии на нижней поверхности вследствие меньшего увлажнения и других внешних воздействующих факторов, а также, возможно, с различным составом продуктов коррозии на обеих сторонах. После удаления продуктов коррозии со стальных пластин, их поверхность была матовой без видимых визуально и под микроскопом питтингов (при увеличении  $\times 60$ ) (рис. 4), что свидетельствует о протекании равномерной коррозии стали Ст3пс. Масса пластин после коррозионных испытаний увеличилась на 2,16 г. После травления средняя потеря массы стальных пластин относительно их массы до коррозионных испытаний составила 5,33 г, а среднегодовая скорость атмосферной коррозии стали Ст3пс –  $161,53 \pm 0,82$  г/(м<sup>2</sup>·год).

**Медь МЗ.** Обе стороны меди МЗ после 12 мес. экспозиции были покрыты крас-





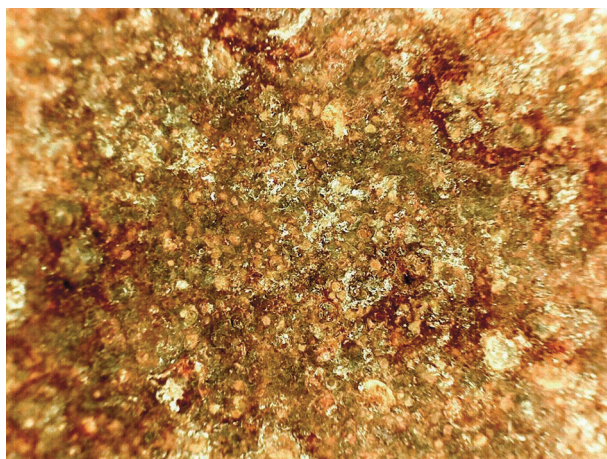
a



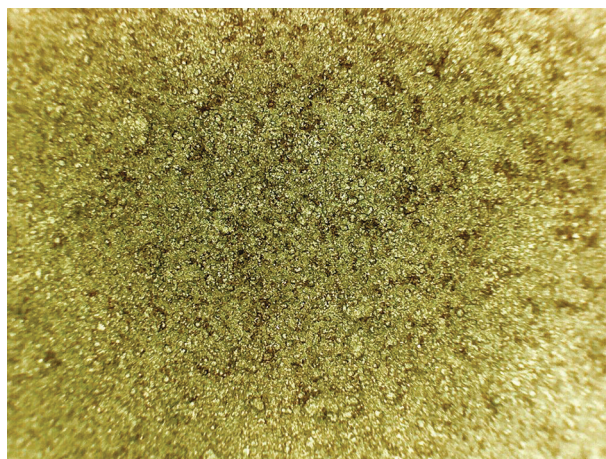
b

**Рис. 3. Микрофотографии поверхности алюминия А5 (х60):  
а – после экспозиции; б – после травления**

**Fig. 3. Microphotographs of aluminium A5 surface (x60):  
a – after exposure; b – after etching**



a



b

**Рис. 4. Микрофотографии поверхности стали Ст3пс (х60):  
а – после экспозиции; б – после травления**

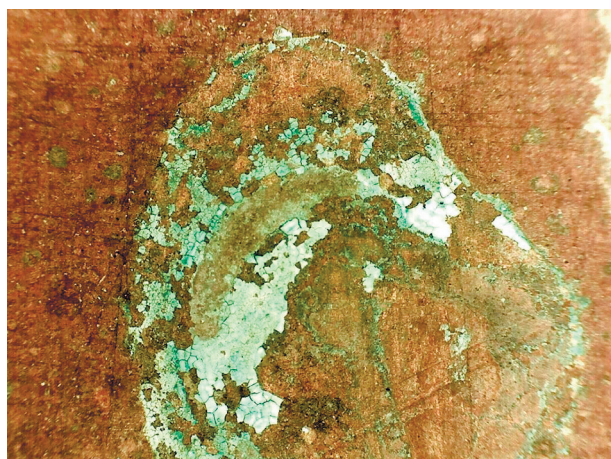
**Fig. 4. Microphotographs of steel St3pc surface (x60):  
a – after exposure; b – after etching**

но-коричневым плотным слоем продуктов коррозии. При увеличении  $\times 60$  на лицевой стороне выявляется значительное питтингообразование (рис. 5), около 100 шт/см<sup>2</sup>, на обратной  $\sim 20$  шт/см<sup>2</sup>. Размеры питтингов 0,2...0,5 мм. Средняя масса медных пластин после 12 мес. коррозионных испытаний увеличилась на 490 мг. После травления средняя потеря массы медных пластин относительно их массы до корро-

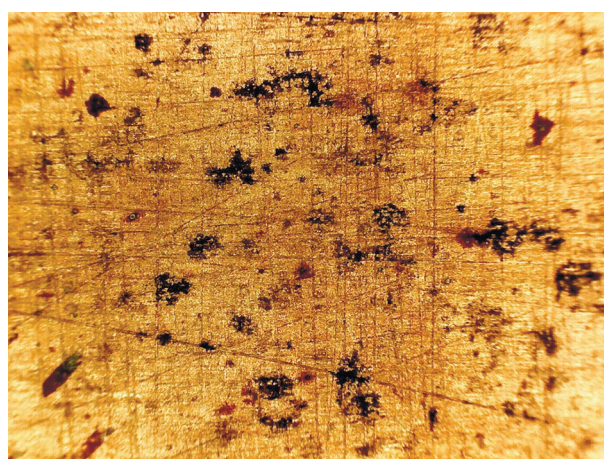
зионных испытаний составила 346,5 мг, среднегодовое значение скорости коррозии меди МЗ –  $10,50 \pm 0,20$  г/(м<sup>2</sup>·год).

**Цинк Ц0А.** Верхняя сторона цинковых пластин Ц0А после 12 мес экспозиции была покрыта пятнами белых продуктов коррозии диаметром 0,5...1 мм, их количество составляло 10...20 шт/см<sup>2</sup> (рис. 6). На нижней стороне их значительно меньше. После травления на верхней стороне наблюдается





a



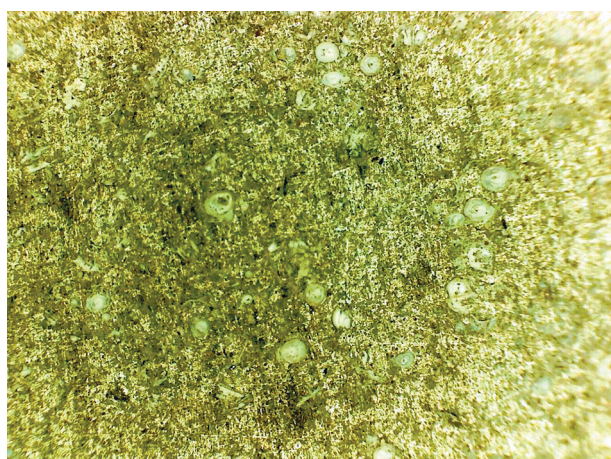
b

**Рис. 5. Микрофотографии поверхности меди МЗ (х60):**

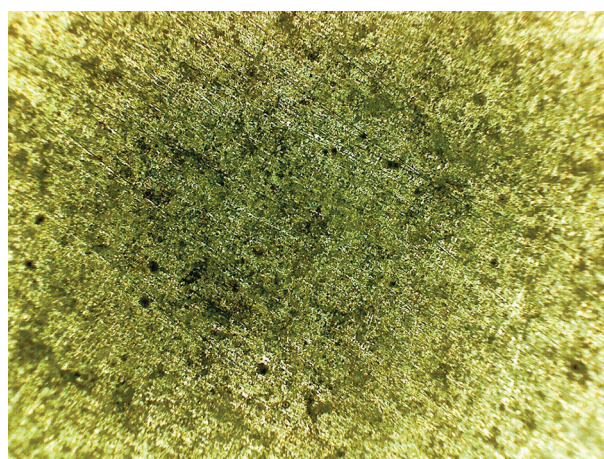
**а – после экспозиции; b – после травления**

**Fig. 5. Microphotographs of copper M3 surface (x60):**

**a – after exposure; b – after etching**



a



b

**Рис. 6. Микрофотографии поверхности цинка Ц0А (х60):**

**а – после экспозиции; b – после травления**

**Fig. 6. Microphotographs of zinc Z0A surface (x60):**

**a – after exposure; b – after etching**

значительное питтингообразование (около 50 шт/см<sup>2</sup> диаметром 0,1...0,4 мм). Масса пластин после коррозионных испытаний увеличилась на 192 мг. После травления средняя потеря массы цинковых пластин относительно их массы до коррозионных испытаний составила 320 мг, а среднегодовая скорость коррозии цинка Ц0А-7,  $20 \pm 0,14$  г/(м<sup>2</sup>·год).

Результаты определения коррозионного состояния, типа коррозии алюминия пер-

вичного марки А5, стали СтЗпс, меди МЗ и цинка Ц0А после 12 мес. натурной экспозиции во влажной тропической атмосфере на КИС Кон Зо приведены в *табл. 1*, а скорости коррозии этих металлов за первый год ( $K_1$ ) – в *табл. 1*.

**2.4 Сопоставление экспериментальных и предсказанных коррозионных потерь металлов за первый год экспозиции**

Таблица 1. Коррозионное состояние и тип коррозии металлов после 12 мес экспозиции на КИС Кон Зо в 2016 году

Table 1. Corrosion condition and type of corrosion of metals after 12 months exposure on Kon Zo corrosion station for 2016 year

№ п/п	Металл / Metal	Внешний вид верхней стороны пластин / The appearance of the upper side of the plates		Тип коррозии / Type of corrosion
		Продукты коррозии / Corrosion products	Состояние после травления / Condition after etching	
1	А5	пятна белых продуктов / white food stains	неглубокий питтинг, пятна Ø 0,1...0,4 мм, 15...30 шт/см <sup>2</sup> / shallow pitting, spots Ø 0,1...0,4 mm, 15...30 pcs/cm <sup>2</sup>	питтинговая / pitting
2	СтЗпс	красно-коричневые продукты коррозии, пятна рыхлой ржавчины / red-brown corrosion products spots of loose rust	матовая, шероховатая / matte, rough	равномерная / uniform
3	М3	темный плотный красно-коричневый налет / dark dense red-brown	питтинг Ø 0,2...0,5 мм, ~100 шт/см <sup>2</sup> / coating pitting Ø 0,2...0,5 mm, ~100 pcs/cm <sup>2</sup>	равномерная, питтинговая / uniform, pitting
4	Ц0А	пятна белых продуктов / spots of white products	питтинг Ø 0,1...0,4 мм, 50 шт/см <sup>2</sup> / pitting Ø 0,1...0,4 mm, 50 pcs/cm <sup>2</sup>	равномерная, питтинговая / uniform, pitting

Для предсказания коррозионных потерь металлов за первый год ( $K_I^{np}$ ) в любых регионах мира в международном стандарте [2] предложены ФДО. Эти ФДО позволяют в первом приближении оценивать  $K_I$  в любых типах атмосфер по среднегодовым метеорологическим и аэрохимическим параметрам атмосферы. Полученные  $K_I^{np}$  можно использовать также для определения категории коррозионности атмосферы любого места испытаний без проведения многократных годовых коррозионных испытаний. Учитывая, что любые ФДО имеют погрешности расчета, для всех металлов дано сопоставление экспериментальных  $K_I$  и прогнозных  $K_I^{np}$  для КИС Кон Зо.

Среднегодовая температура воздуха на КИС Кон Зо выше 10 °С, поэтому в уравнениях (1)–(4) температурные коэффициенты взяты соответственно для металлов:

$f_{St} = -0,054(T-10)$ ;  $f_{Zn} = -0,071(T-10)$ ;  $f_{Cu} = -0,080(T-10)$  и  $f_{Al} = -0,043(T-10)$ . При расчетах использованы следующие среднегодовые параметры атмосферы КИС Кон Зо:

- среднегодовая температура воздуха 28,0 °С;
- среднегодовая относительная влажность воздуха 79,9 %;
- скорость выпадения хлоридов 12,22 мг/м<sup>2</sup>·сут;
- скорость выпадения  $SO_2$  5,58 мг/м<sup>2</sup>·сут.

Результаты расчетов  $K_I^{np}$  в сопоставлении с данными гравиметрии ( $K_I$ ) приведены в табл. 2, из которой видно, что  $K_I^{np}$  имеют достаточно близкие значения с  $K_I$  в случаях алюминия А5, стали СтЗпс и меди М0. В случае цинка Ц0  $K_I^{np}$  наблюдается заметно большее отклонение от  $K_I$ . Для оценки отличия величин  $K_I^{np}$  от  $K_I$  использована относительная погрешность:  $\delta = (K_I^{np} - K_I)/K_I$ .

Из данных табл. 2 следует, что в случае



**Таблица 2. Экспериментальные ( $K_i$ ) и предсказанные по ФДО ( $K_i^{np}$ ) скорости коррозии металлов за первый год экспозиции, погрешность предсказания ( $\delta$ )**

**Table 2. Experimental ( $K_i$ ) and calculated by use Dose-Response Functions values ( $K_i^{np}$ ) of corrosion rate of metals for first year of exposure, the error of the prediction ( $\delta$ )**

Металл / Metal	№ образца / No. sample	$K_i$		$K_i^{np}$		- $\delta$ , %
		мкм/год / $\mu\text{m}/\text{year}$	г/(м <sup>2</sup> ·год) /g/(m <sup>2</sup> ·year)	мкм/год / $\mu\text{m}/\text{year}$	г/(м <sup>2</sup> ·год) /g/(m <sup>2</sup> ·year)	
А5	1					52,8
	2	0,44	1,25			32,0
	3	0,47	1,18	0,61	1,65	40,0
	среднее	0,47	<u>1,17 ± 0,06</u>			<u>41,6</u>
Ст3пс	8...10		160,32	28,77	224,76	40,20
	8...11	20,52	161,51			39,16
	8...12	20,67	162,77			38,08
	среднее	20,86	<u>161,53 ± 0,82</u>			<u>39,15</u>
М3	2...5		10,20	1,62	14,42	41,14
	4...6	1,14	10,52			37,07
	6...3	1,18	10,77			25,31
	среднее	1,21	<u>10,50 ± 0,20</u>			<u>34,51</u>
Ц0А	4		7,12	1,78	12,80	79,78
	5	0,98	7,07			81,05
	6	0,98	7,40			72,97
	среднее	1,03	<u>7,20 ± 0,14</u>			<u>77,93</u>

алюминия А5, стали Ст3пс, меди М3 величины  $K_i^{np}$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными  $K_i$ . Средняя ошибка предсказаний  $K_i^{np}$  составляет для А5 от 32,0 до 52,8%, для Ст3пс – от 38,08 до 40,20%, для М3 – от 25,31 до 41,14%. В случае цинка Ц0, отклонение  $K_i^{np}$  от  $K_i$  заметно больше – от 72,97 до 81,05%. Возможно,

это отчасти связано с неполным удалением малорастворимых продуктов коррозии в мелких питтингах – основного карбоната  $(\text{ZnOH})_2\text{CO}_3$  [10], а также со статистическими неопределенностями, связанными с оценкой атмосферной коррозии с использованием функции доза - ответ [3, Приложение А1] (табл. 3).

**Таблица 3. Расчетные уровни неопределенности для оценки категории коррозионного воздействия**

**Table 3. Calculated levels of uncertainty for the evaluation of the category corrosion impact**

Металл / Metal	Уровень неопределенности / Level of uncertainty	
	Определение (гравиметрия) / Definition (gravimetry)	Оценка (ФДО) / Assessment (DRF)
Углеродистая сталь / Carbon steel	+2%	от -33 % до +50 %
Цинк / Zinc	±5%	от -33 % до +50 %
Медь / Copper	+2%	от -33 % до +50 %
Алюминий / Aluminum	±5%	от -33 % до +50 %

Таблица 4. Категории коррозионной агрессивности атмосферы

Table 4. Categories of corrosiveness of atmosphere

Категория / Category	Коррозионная агрессивность / Corrosive aggressiveness
C1	Очень низкая / Very low
C2	Низкая / Low
C3	Средняя / Medium
C4	Высокая / High
C5	Очень высокая / Very high
CX	Экстремально высокая / Extreme high

Таблица 5. Скорость коррозии,  $r_{corr}$ , полученная (или оцененная) за первый год испытаний для различных категорий коррозионной агрессивности

Table 5. Corrosion rate,  $r_{corr}$ , received or evaluated for the first year full-scale tests to different categories of corrosivity of atmosphere

Коррозионная категория / Corrosivity category	Скорость коррозии металлов, $r_{corr}$ / Corrosion rate of metals, $r_{corr}$				
	Единица измерений / Unit of measurement	Углеродистая сталь / Carbon steel	Цинк / Zinc	Медь / Copper	Алюминий / Aluminum
C1	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$r_{corr} \leq 10$ $r_{corr} \leq 1,3$	$r_{corr} \leq 0,7$ $r_{corr} \leq 0,1$	$r_{corr} \leq 0,9$ $r_{corr} \leq 0,1$	Незначительная —
C2	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$10 < r_{corr} \leq 200$ $1,3 < r_{corr} \leq 25$	$0,7 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$	$0,9 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,6$	$r_{corr} \leq 0,6$ —
C3	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$200 < r_{corr} \leq 400$ $25 < r_{corr} \leq 50$	$5 < r_{corr} \leq 15$ $0,7 < r_{corr} \leq 2,1$	$5 < r_{corr} \leq 12$ $0,6 < r_{corr} \leq 1,3$	$0,6 < r_{corr} \leq 2$ —
C4	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$400 < r_{corr} \leq 650$ $50 < r_{corr} \leq 80$	$15 < r_{corr} \leq 30$ $2,1 < r_{corr} \leq 4,2$	$12 < r_{corr} \leq 25$ $1,3 < r_{corr} \leq 2,8$	$2 < r_{corr} \leq 5$ —
C5	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$650 < r_{corr} \leq 1500$ $80 < r_{corr} \leq 200$	$30 < r_{corr} \leq 60$ $4,2 < r_{corr} \leq 8,4$	$25 < r_{corr} \leq 50$ $2,8 < r_{corr} \leq 5,6$	$5 < r_{corr} \leq 10$ —
CX	г/(м <sup>2</sup> ·год) мкм/год	$1500 < r_{corr} \leq 5500$ $200 < r_{corr} \leq 700$	$60 < r_{corr} \leq 180$ $8,4 < r_{corr} \leq 25$	$50 < r_{corr} \leq 90$ $5,6 < r_{corr} \leq 10$	$r_{corr} > 10$ —



## 2. Категория коррозивности атмосферы КИС Кон Зо

Согласно [2, с. 3], коррозионная агрессивность атмосферы подразделяется на шесть категорий (см. табл. 4). Величины скорости коррозии,  $r_{corr}$ , полученные за первый год натурных испытаний для различных категорий коррозионной агрессивности, указаны в табл. 5 согласно [2, с. 4].

Средняя скорость коррозии исследуемых материалов в  $г/м^2 \cdot год$ , определенная гравиметрическим ( $K_I$ ) и расчетным методом из ФДО ( $K_I^{np}$ ), соответствует данным, приведенным в табл. 6.

Согласно результатам натурных гравиметрических испытаний (12 мес) образцов стандартных металлов, коррозивность атмосферы КИС Кон Зо соответствует для алюминия А5, меди М3 и цинка Ц0А категории С3, для углеродистой стали Ст3пс – С2.

По результатам расчета с помощью функций доза-ответ по ISO 9223:2012 (Е), п.7, коррозивность атмосферы КИС Кон Зо соответствует для алюминия А5, стали Ст3пс и

цинка Ц0А категории С3, для меди М3 – С4.

## Выводы

1. Скорости коррозии после годовой натурной экспозиции во влажной тропической атмосфере Южного Вьетнама (Кон Зо) по данным гравиметрии составили: для алюминия А5  $1,17 \pm 0,06$   $г/(м^2 \cdot год)$ ; стали Ст3пс  $161,53 \pm 0,82$   $г/(м^2 \cdot год)$ ; меди М3  $10,50 \pm 1,54$   $г/(м^2 \cdot год)$ ; цинка Ц0А  $7,20 \pm 0,14$   $г/(м^2 \cdot год)$ .

2. Рассчитанные с помощью функций доза-ответ по метеорологическим и аэрохимическим параметрам атмосферы на КИС Кон Зо величины скорости коррозии для алюминия А5, стали Ст3пс, меди М3 величины  $K_I^{np}$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными  $K_I$ . Средняя ошибка предсказаний  $K_I^{np}$  для А5 составляет 41,6%, для Ст3пс – 39,15%, для М3 – 34,51%. В случае цинка Ц0, отклонение  $K_I^{np}$  от  $K_I$  заметно больше – 77,93%.

3. Согласно результатам натурных гравиметрических испытаний (12 мес) образцов стандартных металлов, коррозивность ат-

**Таблица 6. Категории коррозивности атмосферы КИС Кон Зо по результатам 12 мес натурных испытаний и расчета ФДО по ISO 9223:2012 (Е), п. 7**  
**Table 6. Categories of corrosiveness of Kon Zo corrosion station atmosphere by results of 12 months full-scale tests and calculation of DRF according to ISO 9223:2012 (E), p. 7**

Материал образцов / Sample material	Скорость коррозии за 12 мес экспозиции, $г/м^2 \cdot год$ / Corrosion rate for 12 months of exposure, $г/м^2 \cdot year$		Категория коррозивности / Corrosivity category	
	$K_I$	$K_I^{np}$	$K_I$	$K_I^{np}$
Алюминий первичный марки А5 / Primary aluminum brand А5	$1,17 \pm 0,06$	1,65	С3	С3
Сталь Ст3пс / Steel St3ps	$161,53 \pm 0,82$	224,76	С2	С3
Медь марки М3 / Copper brand М3	$10,50 \pm 1,54$	14,42	С3	С4
Цинк марки Ц0А / Zinc brand Ts0A	$7,20 \pm 0,14$	12,80	С3	С3

мосферы КИС Кон Зо соответствует для алюминия А5, меди М3 и цинка Ц0А к категории С3, для углеродистой стали СтЗпс – С2. По результатам расчета с помощью функций доза-ответ по ISO 9223:2012 (Е), п.7, коррозионность атмосферы КИС Кон Зо соответствует для алюминия А5, стали СтЗпс и цинка Ц0А категории С3, для меди М3 – С4.

Авторы выражают благодарность за организацию работы д.т.н. Карпову В.А., зам. директора ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова, сотрудникам Российско-Вьетнамского Тропического центра Нонг Куок Куангу и Нгуен Чи Кыонгу за помощь в работе, а также рецензентам за ценные замечания.

### Литература

1. Ву Дин Вуй. Атмосферная коррозия металлов в тропиках. – М.: Наука, 1994. – 240 с.
2. ISO 9223:2012 (Е). Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation.
3. Михайлов А.А., Тидблад Дж., Кучера В. Классификационная система стандарта ИСО 9223 и функции доза-ответ для оценки коррозионности открытых атмосфер // Защита металлов. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 601-610.
4. Карпов В.А., Ивонин В.Н., Ты Минь Тиен, Тимонин В.А., Михайлова О.Л., Ковальчук Ю.Л., Фам Зуй Нам, Ха Хыу Шон. Определение коррозионности атмосферы на испытательных станциях Тропического центра и в некоторых районах Вьетнама // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 9. – С.1-7.
5. ASTM G50-10. Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals, 2015.
6. ГОСТ 9.909-86. ЕСКЗС. Металлы, сплавы. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях.
7. ГОСТ 9.039-74. ЕСЗКС. Приложение 1. Методики определения содержания в воздухе двуокиси серы, хлоридов и аммиака.
8. ASTM G1-03. Standard Practice for

Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, 2011.

9. ГОСТ 9.907-2007. Металлы, сплавы, покpытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний.

10. Leygraf C., Wallinder I.O., Tidblad J., Graedel T. Atmospheric Corrosion. Second Edition. Wiley, 2016. – 400 p.

### References

1. Vu Din Vui. (1994). *Atmospheric Corrosion of metals in tropics*. Moscow: Science.
2. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation. ISO 9223:2012 (Е).
3. Mikhailov, A. A., Tidblad, J., Kuchera, V. (2004). Classification system of ISO 9223 standard and Dose-Response Functions of outdoor atmospheres. *Protection of metals*, 40(6), 601-610.
4. Karpov, V. A., Ivonin, V. N., Thi Minh Tien, Timonin, V. A., Mikhailova, O. L., Kovalchuk, Yu. L., Pham Zui Nam, & Kha Hiu Shon. (2014). Determination of Corrosivity of atmosphere on testing station Tropical Center and some districts of Vietnam. *Corrosion: Materials, protection*, (9), 1-7.
5. Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals. (2015). *ASTM G50-10*.
6. ESKZS. Metals, alloys. Metal and non-metal inorganic coatings. Test methods at climatic testing stations. *GOST 9.909-86*.
7. ESKZS. Appendix 1. Methods for determining the content in the air of sulfur dioxide, chlorides and ammonia. *GOST 9.039-74*.
8. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. (2011). *ASTM G1-03*.
9. Metals, alloys, metal coatings. Methods for removing corrosion products after corrosion tests. *GOST 9.907-2007*.
10. Leygraf, C., Wallinder, I.O., Tidblad, J., Graedel, T. (2016). *Atmospheric Corrosion*. Second Edition. Wiley.

### Информация об авторах

**Ануфриев Николай Геннадиевич**, к.х.н., н.с., Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская Федерация  
**Кузенков Юрий Александрович**, к.х.н., заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская Федерация

### Information about authors

**Nikolay G. Anufriev**, Ph.D. in Chemistry, leading researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation  
**Yuri A. Kuzenkov**, Ph.D. in Chemistry, Head of the Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-2

**Улучшение эксплуатационных и противокоррозионных свойств  
пленкообразующей основы грунтовок для огнезащитных покрытий**

**В.С. Сучков<sup>1</sup>✉, С.Н. Степин<sup>1,2</sup>, О.П. Кузнецова<sup>1</sup>, М.С. Давыдова<sup>1</sup>,  
И.Г. Москвин<sup>1</sup>, Г.Р. Залялютдинова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68

<sup>2</sup>Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской Академии Наук,  
199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, набережная Адмирала Макарова, д. 2

*e-mail: suchkov.vs@mail.ru*

**Аннотация.** Состав и структура огнезащитных покрытий не обеспечивают требуемых адгезионных и защитных противокоррозионных свойств, в связи с чем для устранения этих недостатков необходимо использовать специальные грунтовки. Согласно предназначению, используемые для этих целей грунтовки должны обладать достаточно высокой термостойкостью. Наиболее высокой стойкостью к воздействию высоких температур характеризуются кремнийорганические полимеры, из которых в области лакокрасочных покрытий нашли применение полиорганосилоксановые олигомеры. Однако покрытия на их основе, формируемые без термического стимулирования, отличаются хрупкостью, неудовлетворительными адгезионными и барьерными свойствами и, как следствие, низкой противокоррозионной эффективностью. С целью обеспечения химического структурирования полиорганосилоксановых олигомеров в процессе формирования покрытий без воздействия повышенных температур были синтезированы функциональные добавки, представляющие собой продукты присоединения 3-аминопропилтриэтоксисилана к полиэфирам с концевыми эпоксидными группами различной функциональности и строения. Исследовано влияние полученных аддуктов на противокоррозионные свойства и эксплуатационные характеристики полиорганосилоксановых покрытий. Данные, полученные в результате проведенного исследования, позволили сделать вывод о том, что улучшению противокоррозионных и других эксплуатационных свойств полиорганосилоксановых покрытий способствует разветвленное строение макромолекулы отвердителя, причем увеличение расстояния между узлами сшивки повышает уровень их химического структурирования. Анализ полученных данных позволил выбрать оптимальные состав и содержание функциональной добавки обеспечивающей достижение максимальной противокоррозионной эффективности покрытий в сочетании с высокими адгезионными и физико-механическими свойствами без заметной потери их термостойкости.

**Ключевые слова:** грунтовка, противокоррозионная, полисилоксановая, термостойкая, отвердитель, синтез.

**Для цитирования:** Сучков В.С., Степин С.Н., Кузнецова О.П., Давыдова М.С., Москвин И.Г., Залялютдинова Г.Р. Улучшение эксплуатационных и противокоррозионных свойств пленкообразующей основы грунтовок для огнезащитных покрытий // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 19-25. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-2

*Статья получена: 19.10.2022, опубликована 01.12.2022.*

**Improving the operational and anticorrosive properties  
of the film-forming base of primers for fire-retardant coatings**

**V.S. Suchkov<sup>1</sup>✉, S.N. Stepin<sup>1,2</sup>, O.P. Kuznetsova<sup>1</sup>, M.S. Davydova<sup>1</sup>,  
I.G. Moskvina<sup>1</sup>, G.R. Zalyalyutdinova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University,  
68, Karl Marx st., Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Grebenshchikov of the Russian Academy of Sciences,  
2, Admiral Makarov Embankment, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

*e-mail: suchkov.vs@mail.ru*

**Abstract.** The composition and structure of flame-retardant coatings do not provide the required adhesive and protective anticorrosive properties, and therefore it is necessary to use special primers to eliminate these shortcomings. According to the purpose, the primers used for these purposes should have a sufficiently high temperature resistance. The highest resistance to high temperatures, of which polyorganosiloxane oligomers have found application in the field of paint coatings, characterizes Organosilicon polymers. However, coatings based on them, formed without thermal stimulation, are characterized by fragility, unsatisfactory adhesive and barrier properties and, as a result, low anticorrosive efficiency. In order to ensure the chemical structuring of polyorganosiloxane oligomers during the formation of coatings without exposure to elevated temperatures, functional additives were synthesized, which are products of the addition of 3-aminopropyltriethoxysilane to polyesters with terminal epoxy groups of various functionality and structure. The effect of the obtained adducts on the anticorrosive properties and operational characteristics of polyorganosiloxane coatings investigated. The data obtained as a result of the study made it possible to conclude that the branched structure of the hardener contributes to the improvement of the anticorrosive and other operational properties of polyorganosiloxane coatings, and an increase in the distance between the crosslinking nodes increases the level of their chemical structuring. The analysis of the obtained data made it possible to choose the optimal composition and content of the functional additive ensuring the achievement of maximum anticorrosive effectiveness of coatings in combination with high adhesive and physico-mechanical properties without a noticeable loss of their heat resistance.

**Keywords:** primer, anticorrosive, polysiloxane, heat-resistant, hardener, synthesis.

**For citation:** Suchkov, V. S., Stepin, S. N., Kuznetsova, O. P., Davydova, M. S., Moskvina, I. G. & Zalyutdinova, G. R. (2022). Improving the operational and anticorrosive properties of the film-forming base of primers for fire-retardant coatings. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(4), 19-25. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-2

Received: October 19, 2022. Published: December 01, 2022.

## Введение

Ряд крупномасштабных пожаров в торговых, развлекательных центрах и др. массово посещаемых объектах вызвал активизацию рецептурных и технологических разработок в области огнезащитных покрытий. При этом очевидна необходимость использования грунтовок, обеспечивающих противокоррозионную защиту при эксплуатации окрашенного объекта и предотвращающих отслаивание огнезащитного слоя покрытия в условиях огневого воздействия. Последнее предполагает наличие термостойкости пленкообразующей основы грунтовки.

Известно, что наиболее высокой термостойкостью отличаются кремнийорганические полимеры. В качестве пленкообразующей основы для красок, лаков и покрытий, как правило, используются олигомерные полиорганосилоксаны, полученные сополиконденсацией смесей органохлорсиланов различной функциональности в смеси толуола и изобутанола. Олигомеры, синтезированные этим методом, имеют довольно сложную структуру со случайным распределением фрагментов линейной, циклической, разветвленной, циклолинейной, лестничной структуры и содержат концевые силанольные группы [1]. С учетом состава среды, в которой протекает синтез, силанольные группы полученного продукта бутанолизированы и характеризуются низкой гидролизующей влажностью воздуха, что

препятствует их участию в реакции конденсации в процессе формирования покрытий. Следствием этого являются хрупкость и, как правило, недостаточно высокие адгезионные, барьерные и физико-механические характеристики полиорганосилоксановых покрытий естественной сушки.

Для устранения этих недостатков идут по пути термообработки покрытий при 250...300 °C с целью активации силанольных групп и химического структурирования полиорганосилоксана [2]. Однако такое усложнение технологии формирования покрытий существенно ограничивает область их применения, в частности, в связи с невозможностью нагрева таких крупногабаритных объектов как, например, мосты, хранилища нефтепродуктов, опоры линий электропередач и т.п. [3]. Путем расширения области применения полиорганосилоксановых покрытий является придание их пленкообразующей основе способности к химическому структурированию без подвода тепла, в естественных условиях [4-6].

## Методики экспериментов

В данной работе исследовали возможность использования при получении грунтовок для огнезащитных покрытий полиорганосилоксанового лака SiAS-600 производства ООО НПП «Спектр».

Для получения покрытий лак наносили на предварительно подготовленные ме-



таллические и стеклянные образцы пневмораспылением и ракелем. Толщина формируемых покрытий составляла  $30 \pm 5$  мкм. Поверхность образцов стали 08 кп и жести готовили для нанесения покрытий путем обработки шкуркой №100 и последующей последовательной протиркой толуолом и ацетоном. Подготовка стеклянных образцов заключалась в протирке ацетоном.

Формирование покрытий контролировали посредством мониторинга их твердости, которую измеряли с помощью маятникового прибора, согласно ГОСТ 5233-89. Процесс получения покрытий считали завершенным при достижении предельного, неизменного во времени значения этого параметра.

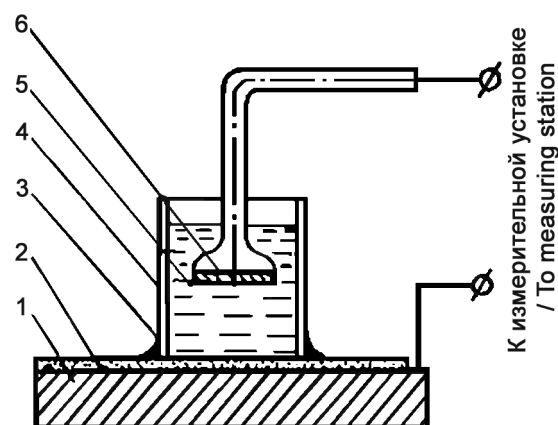
Эксплуатационные свойства сформированных покрытий исследовали согласно соответствующей нормативной документации: прочность при ударе (ISO 6272-2), изгибе (ISO 1519:2002), адгезия методом решетчатых надрезов (ISO 2409:2013). О степени химического структурирования покрытий судили по количеству двойных протирок ацетоном.

В качестве критериев защитных свойств покрытий использовали мониторинг коррозионного потенциала (относительно хлорсеребряного электрода сравнения) окрашенного металла в контакте с коррозионно-активной средой и коэффициента, равного отношению емкостей системы окрашенный металл/электролит при 2000 и 20000 Гц:  $K_f = C_{2000}/C_{20000}$ , где  $C_{2000}$  и  $C_{20000}$  – емкость испытуемой системы при частоте ( $f$ ) 2000 и 20000 Гц соответственно. Значение  $K_f$ , равное 1 при максимально высоких защитных свойствах покрытия, снижается по мере потери его изолирующей способности.

Контакт испытуемого образца с коррозионно-активной средой и измерения исследуемых параметров осуществляли с помощью ячейки, представленной на рис. 1. В качестве коррозионно-активной среды (электролита) использовали трехпроцентный водный раствор хлорида натрия.

Измерение частотной зависимости емкости осуществляли согласно методике, описанной в ГОСТ 9.409-88 на приборе RCL Fluke PM 6306-571.

Значение электродного потенциала, ко-



**Рис. 1. Электрохимическая ячейка:**  
1 – металл; 2 – покрытие; 3 – уплотнитель; 4 – стеклянная трубка;  
5 – коррозионно-активная среда;  
6 – вспомогательный электрод

**Fig. 1. Electrochemical cell:**  
1 – metal;  
2 – coating; 3 – sealant; 4 – glass tube;  
5 – corrosive environment;  
6 – auxiliary electrode

торый является индикатором активного или пассивного состояния металла, контролировали с помощью потенциометра – pH-метра pH-150 M.

### Результаты и их обсуждение

Как видно из результатов исследования, приведенных в табл. 1, покрытия, сформированные на основе лака SiAS-600, обладают недостаточно высокими физико-механическими и адгезионными свойствами. Подтверждением низкой эффективности реакции гидролиза бутанолизированных силанольных групп с участием влаги воздуха явилась неустойчивость покрытий естественной сушки на основе SiAS-600 к протиркам ацетоном.

Резкое падение значения  $K_f$  на начальной стадии испытаний и установление значения потенциала окрашенного металла в области, отвечающей коррозии железа (рис. 2 и 3), свидетельствуют о неудовлетворительных защитных свойствах покрытий.

Поэтому целью дальнейших исследований явилось улучшение комплекса эксплуатационных свойств покрытий холодной сушки на основе лака SiAS-600, посредством

Таблица 1. Свойства покрытий на основе SiAS-600

Table 1. Properties of coatings based on SiAS-600

Адгезия, балл / Adhesion, point	Удар, см / Impact, cm	Прочность при изгибе, мм / Bending strength, mm	Количество двойных протирок ацетоном / Number of double wipes with acetone
5	менее 5 / less than 5	более 20 / more than 20	1

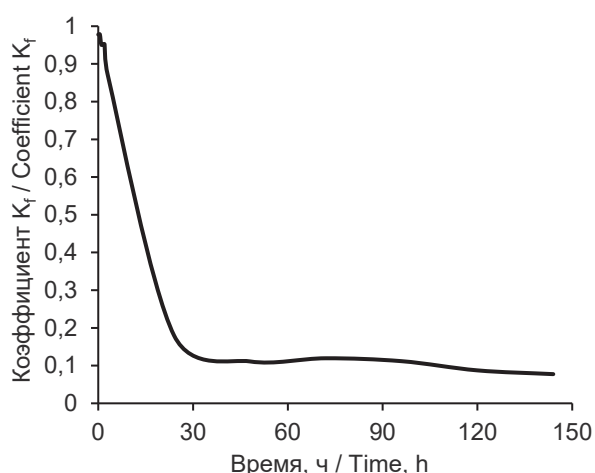


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $K_f$  от времени испытания образца с лаком SiAS-600

Fig. 2. Dependence of the  $K_f$  coefficient on the test time of the sample with SiAS-600 varnish

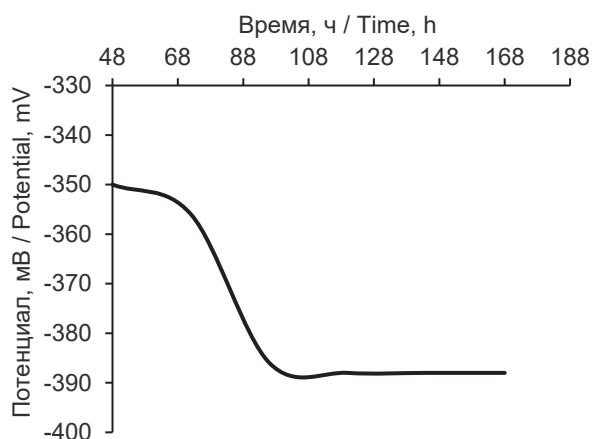


Рис. 3. Кинетика изменения коррозионного потенциала стали с лаком SiAS-600

Fig. 3. Kinetics of changes in the corrosion potential of steel with SiAS-600 varnish

введения функциональных добавок (отвердителей), в качестве которых использовали продукты присоединения 3-аминопропилтриэтоксисилана к соединениям (табл. 2).

Реакции присоединения осуществляли при 120 °С в реакционной колбе, снабженной мешалкой, термометром, обратным холодильником, колбонагревателем и, в случае использования в качестве прекурсора лапрола 502, ловушкой Дина-Старка. Течение реакций контролировали посредством мониторинга ИК-спектра реакционной массы после смешения исходных компонентов. Их завершение связывали с отсутствием идентификации полос поглощения, относящихся к функциональным группам, участвующим в реакции. Полученные аддукты содержат этоксисилановые группы, отличающиеся от бутоксисилановых более высокой химической активностью в реакциях гидролиза влагой воздуха с образованием силанольных групп, участвующих в реакции конденсации.

Полученные добавки смешивали в заданном соотношении с лаком перед нанесением покрытий. При этом считали, что включение отвердителя в состав покрытия способствует насыщению полиорганосилоксанового пленкообразователя полярными функциональными группами, что обеспечивает поперечную сшивку олигомерных цепей при формировании покрытий и активацию взаимодействия с поверхностью субстрата. Подтверждением этого являются данные, приведенные в табл. 3, свидетельствующие об улучшении физико-механических свойств и адгезии покрытий в результате добавки синтезированных структурирующих добавок. Анализ представленных результатов исследований позволяет выбрать в качестве оптимального варианта использование 20% добавки АЛ-93.

**Таблица 2. Характеристики прекурсоров - сореагентов АГМ-9 при получении отвердителей**  
**Table 2. Characteristics of AGM-9 co-reagent precursors in the preparation of hardeners**

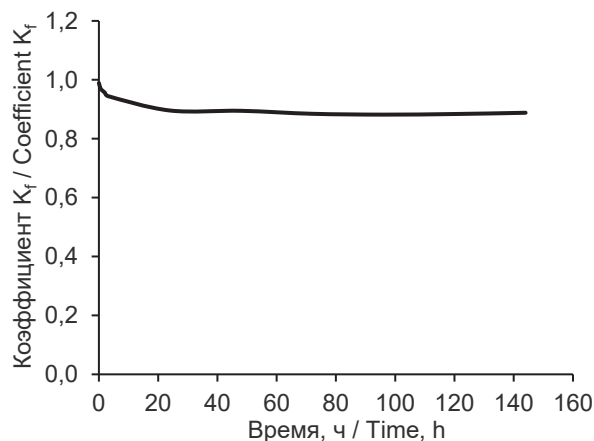
Химическое название / Chemical name	Коммерческая марка / Commercial brand	Функциональность / Functionality	Обозначение продукта / Product name
Диглицидиловый эфир неопентилгли- коля / Diglycidyl ether of neopentyl glycol	Лапроксид НЕО / Laproxide NEO	2	АЛН / ALN
Триглицидиловый эфир полиоксипропи- лентриола / Triglycidyl ether of polyoxypropylentriol	Лапроксид 603 / Laproxide 603	3	АЛ-93 / AL-93
Полиоксипропилен- диол / Polyoxypropylene diol	Лапрол 502 / Laprol 502	2	АЛ-92 / AL-92

**Таблица 3. Свойства покрытий, содержащих отвердители**  
**Table 3. Properties of coatings containing hardeners**

Свойства покрытий / Coating Properties	Содержание отвердителя / Hardener content								
	АЛН / ALN			АЛ-92 / AL-92			АЛ-93 / AL-93		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Адгезия, балл / Adhesion, point	1	2	2	2	0	0	2	0	0
Удар, см / Impact, cm	30	45	50	5	45	50	35	50	50
Прочность при изгибе, мм / Bending strength, mm	15	10	6	10	3	3	1,5	1	1
Протирки ацетоном / Wipes with acetone	5	8	10	4	12	37	Более 100 / more than 100		

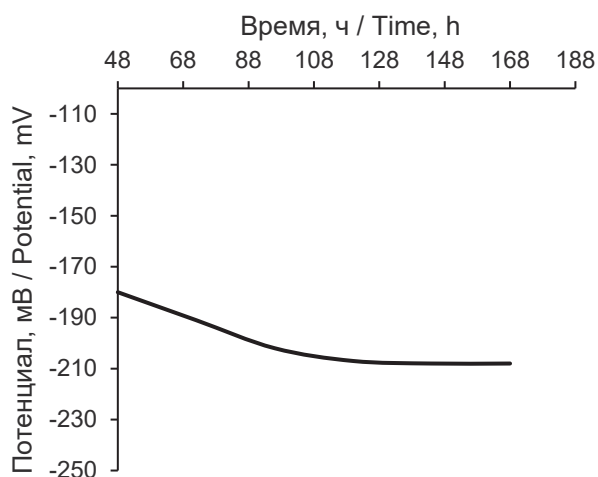


Сопоставление результатов исследований, приведенных на *рис. 4 и 5*, свидетельствует о значительном усилении их защитной способности в результате химического структурирования: значение  $K_f$  держится на стабильно высоком уровне, а потенциал окрашенного металла смещен в положительную область значений, отвечающую его пассивному состоянию.



**Рис. 4. Зависимость коэффициента  $K_f$  от времени испытания образца с лаком, модифицированным отвердителем АЛ-93**

**Fig. 4. Dependence of the coefficient  $K_f$  on the test time of the sample with a varnish modified with the hardener AL-93**

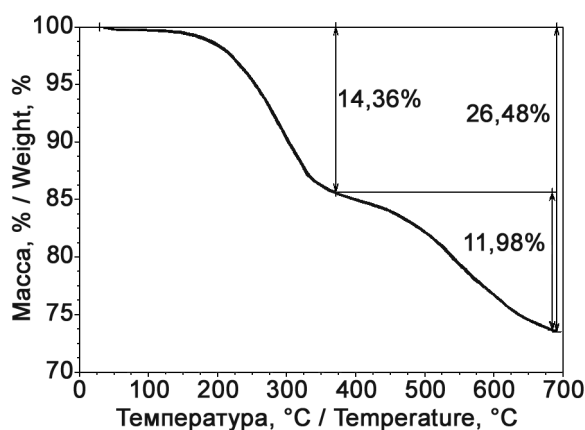


**Рис. 5. Кинетика изменения коррозионного потенциала стали с лаком SiAS-600, модифицированным отвердителем АЛ-93**

**Fig. 5. Kinetics of changes in the corrosion potential of steel with SiAS-600 varnish modified with AL-93 hardener**

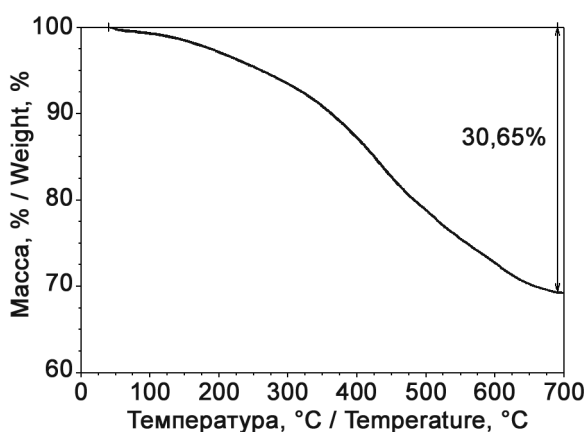
При этом следует отметить, что включение органической составляющей (в составе отвердителя) не приводит к решающим изменениям термостойкости кремнийорганических покрытий. Как видно из сопоставления термогравиметрических кривых, представленных на *рис. 6 и 7*, разница в потере массы исходного и отвержденного покрытий при 500 °С составляет лишь 4 %.

Необычная форма кривой на *рис. 6*, имеющей «провал» в интервале 200...450 °С, можно объяснить содержанием в составе SiAS-600 низкомолекулярных фракций, удаляемых в указанных температурных пределах испарением. Потеря летучести этой части пленкообразователя в результате хи-



**Рис. 6. Кривая потери массы лака SiAS-600**

**Fig. 6. SiAS-600 varnish mass loss curve**



**Рис. 7 Кривая потери массы лака SiAS-600 с добавлением химически структурирующей добавки (20% АЛ-93)**

**Fig. 7 The weight loss curve of SiAS-600 varnish with the addition of a chemically structuring additive (20% AL-93)**

мического структурирования приводит к наблюдаемому изменению термогравиметрической кривой.

### Выводы

Изложенное позволяет сделать заключение о возможности использования разработанной структурирующей добавки с целью улучшения защитных и адгезионных свойств покрытий на основе полиорганосилоксанового лака при незначительном изменении их термостойкости.

### Литература

1. Хананашвили Л.М. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимеров. – М.: Химия, 1998. – 63 с.
2. Elgar E., Yilgor I. Silicone containing copolymers: synthesis, properties and applications // Prog. Polym. Sci. – 2014. – V. 39. – P. 1165-1195.
3. Чуппина С.В., Жабров В.А. Органосиликатные материалы. – СПб.: Издательство «Литео», 2016. – 182 с.
4. Lorenz G., Kandelbauer A. Silicones, Handbook of Thermoset Plastic. – 3-d edition. – Publisher: Raytheon Systems Company. – 2014. – P. 555-575.
5. Ding L. I. U., Yang Y. U., Le M. I., Yun Y. U., Li-Xin S. O. N. G. Preparation of Room Temperature Curable Organic-inorganic Hybrid Thermal Control Coatings Wuji Cailiao Xuebao // Journal of Inorganic Materials. – 2018. – V. 33, № 8. – С. 914-918. doi: 10.15541/jim20180092

6. Gardellea B., Duquesne S., Vandereecken P., Bellayer S., Bourbigot S. Resistance to fire of intumescent silicone based coating: the role of organoclay // Progress in Organic Coatings. – 2013. – V. 76, № 11. – P. 1633-1641. doi: org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.011

### References

1. Khananashvili, L. M. (1998). *Chemistry and technology of organoelement monomers and polymers*. Moscow: Chemistry.
2. Elgar, E., Yilgor, I. (2014). Silicon-containing copolymers: synthesis, properties and application. *Polym. Sciences*, 39, 1165-1195.
3. Chuppina, S. V., Zhabrev, V. A. (2016). *Organosilicate materials*. St. Petersburg : Liteo Publishing House.
4. Lorenz, G., Kandelbauer, A. (2014). *Silicones, Handbook of Thermosetting Plastics* (3rd ed.). Publisher: Raytheon Systems Company.
5. Ding, L. I. U., Yang, Y. U., Le, M. I., Yun, Y. U., & Li-Xin, S. O. N. G. (2018). Preparation of room temperature curable organic-inorganic hybrid thermal control coatings. *Journal of Inorganic Materials*, 33(8), 914-918. doi: org/10.15541/jim20180092
6. Gardelle, B., Duquesne, S., Vandereecken, P., Bellayer, S., & Bourbigot, S. (2013). Resistance to fire of intumescent silicone based coating: The role of Organoclay. *Progress in Organic Coatings*, 76(11), 1633-1641. doi: org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.011

### Информация об авторах

**Сучков Владислав Сергеевич**, аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), г. Казань, Российская Федерация  
**Степин Сергей Николаевич**, д.х.н., профессор, КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация; Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской Академии Наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
**Кузнецова Оксана Порфирьевна**, к.т.н., доцент, КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация  
**Давыдова Марина Сергеевна**, к.т.н., доцент, КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация  
**Москвин Иван Германович**, студент, КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация  
**Залаялютдинова Гузель Равиловна**, старший преподаватель, КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация

### Information about authors

**Vladislav S. Suchkov**, postgraduate student, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russian Federation  
**Sergey N. Stepin**, Doctor of Chemistry, Professor, KNRTU, Kazan, Russian Federation; I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation  
**Oksana P. Kuznetsova**, Ph.D. in Technical Sciences, associate professor, KNRTU, Kazan, Russian Federation  
**Marina S. Davydova**, Ph.D. in Technical Sciences, associate professor, KNRTU, Kazan, Russian Federation  
**Ivan G. Moskvina**, student, KNRTU, Kazan, Russian Federation  
**Guzel R. Zalyalyutdinova**, senior lecturer, KNRTU, Kazan, Russian Federation



## **МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

## **METHODS AND EQUIPMENT FOR CORROSION PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-3

### **Ингибиторы солеотложений и коррозии на основе органофосфонатов**

**Б.Н. Дрикер<sup>1</sup>✉, Н.В. Цирульникова<sup>2</sup>✉, А.А. Протазанов<sup>1</sup>, Н.Н. Стягов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет,  
РФ, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

<sup>2</sup>Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
(НИЦ «Курчатовский институт – ИРЕА»),  
РФ, 107076, г. Москва, Богородский Вал, д. 3

e-mail: bndriker70191@mail.ru,

e-mail: nv.tsir@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена созданию на основе органофосфонатов (ОФ) композиций многоцелевого назначения для одновременного ингибирования солеотложений и коррозии в системах водопользования. Проведен сопоставительный анализ эффективности ингибиторов солеотложений и коррозии на основе ОФ различного химического состава и строения и их комплексонов с цинком и магнием. Установлено, что с ростом количества функциональных групп в молекуле реагента и увеличении длины углеводородного радикала, соединяющего аминометиленфосфоновые группы, наблюдается рост кинетических параметров зародышеобразования и, соответственно, их эффективность. В качестве ингибиторов солеотложений и коррозии испытаны цинковые и магниевые комплексоны, полученные при мольном соотношении 2,5:1 (ОФ:Ме). Установлено, что магниевые комплексоны не уступают цинковым. Снижение коррозии обусловлено образованием защитной пленки на поверхности металла. Образование защитной пленки подтверждается результатами эллипсометрических исследований (спектральный светодиодный эллипсометр SPEL-7LED) и результатами элементного анализа (атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo).

**Ключевые слова:** композиция, ингибитор солеотложений, ингибитор коррозии, оценка эффективности.

**Для цитирования:** Дрикер Б.Н., Цирульникова Н.В., Протазанов А.А., Стягов Н.Н. Ингибиторы солеотложений и коррозии на основе органофосфонатов // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 26-35. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-3

Статья получена: 20.07.2022, опубликована 01.12.2022.

## **Salt deposition and corrosion inhibitors based on organophosphonates**

**B.N. Driker<sup>1</sup>✉, N.V. Tsurulnikova<sup>2</sup>✉, A.A. Protazanov<sup>1</sup>, N.N. Styagov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ural State Forest Engineering University,  
37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Chemical Reagents and Highly Pure Chemicals, National Research Center «Kurchatov Institute» (NITs «Kurchatov Institute» – IREA),  
3, Bogorodsky Val, Moscow, 107076, Russian Federation

e-mail: bndriker70191@mail.ru,

e-mail: nv.tsir@mail.ru

**Abstract.** The work is devoted to the creation of multi-purpose compounds based on organophosphonates (OF) for simultaneous inhibition of salt deposition and corrosion in water use systems. A comparative analysis of the effectiveness of salt deposition and corrosion inhibitors based on OP of various chemical composition and structure and their complexes with zinc and magnesium was carried out. It was found that with an increase in the number of functional groups in the reagent molecule and an increase in the length of the hydrocarbon radical connecting the aminomethylene-phosphone groups, an increase in the kinetic parameters of nucleation and, accordingly, their efficiency is observed. Zinc and magnesium complexes obtained at a molar ratio of 2.5:1 (OF:Me) were tested as salt deposition and corrosion inhibitors. It is established that magnesium complexones are not inferior to zinc ones. The decrease in the corrosion is due to the formation of a protective film on the metal surface. The formation of a protective film is confirmed by the results of ellipsometric studies (spectral LED ellipsometer SPEL-7LED) and the results of elemental analysis (atomic emission spectrometer with inductively coupled plasma iCAP 6300 Duo).

**Keywords:** composition, salt deposition inhibitor, corrosion inhibitor, efficiency assessment.



**For citation:** Driker, B. N., Tsirolnikova, N. V., Protazanov, A. A. & Styagov, N. N. (2022). Salt deposition and corrosion inhibitors based on organophosphonates. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(4), 26-35. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-3

Received: July 20, 2022. Published: December 01, 2022.

## Введение

Процессы технического перевооружения промышленности – замена устаревших процессов новыми, позволяющими снизить затраты на производство, уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду и др., являются актуальной задачей современных технологий. Однако образование минеральных отложений и коррозии препятствует этому в системах водоснабжения и водопотребления.

Для предотвращения минеральных отложений используется обработка воды реагентами, ингибирующими процесс их образования. Среди них наибольший интерес представляют полифосфаты, органические фосфонаты (ОФ) (различного химического состава и строения), поликарбоксилаты, полиакрилаты, полиметакрилаты (с молекулярной массой до 10000) [1-4]. Механизм их действия заключается в адсорбции на поверхности микроразрадышей кристаллизующейся соли, препятствующей их дальнейшему росту. Расход реагентов зависит от качества воды и условий эксплуатации, но не превышает 5 мг/дм<sup>3</sup>.

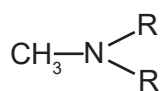
ОФ также могут быть использованы и для ингибирования процессов коррозии. В этом случае применяются композиции, содер-

жащие в своем составе их комплексоны, в частности, с цинком. Снижение коррозии обусловлено образованием на поверхности металла защитной пленки. Однако расход реагентов, в пересчете на ОФ, увеличивается на порядок и составляет 15...100 мг/дм<sup>3</sup> [5-11]. Это обстоятельство, с учетом большего расхода и ПДК по цинку в водоемах культурно-бытового назначения, составляющего 1 мг/дм<sup>3</sup> и в водоемах рыбохозяйственного назначения – 0,01 мг/дм<sup>3</sup>, ограничивает возможности их применения.

Актуальным является создание ингибиторов на основе ОФ, а также композиций, не содержащих экологически-опасных аддендов, которые будут эффективно ингибировать коррозию и солеотложения при более низких концентрациях, что позволит использовать их при ужесточении требований как к качеству используемой в системах воды, так и сбросных и сточных вод.

## Методика эксперимента

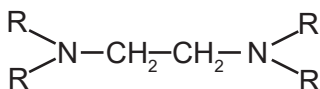
В качестве объектов исследований использовали ОФ, отличающиеся количеством функциональных групп в молекуле реагента и длиной углеводородного радикала, соединяющего аминотетраметилфосфоновые группы:



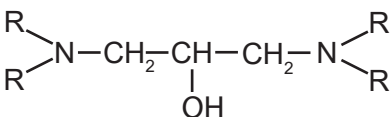
– метилиминодиметилфосфоновая кислота (МИДФ),



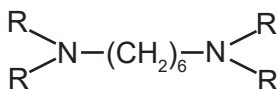
– нитрилотриметилфосфоновая кислота (НТФ),



– этилендиаминтетраметилфосфоновая кислота (ЭДТФ),



– 2-оксидиаминопропантетраметилфосфоновая кислота (ДПФ),



– гексаметилендиаминтетраметилфосфоновая кислота (ГМДФ),

где  $R - CH_2PO_3H_2$ , а также их композиционные составы, содержащие цинковые и магниевые комплексоны при мольном соотношении ОФ:Ме=2,5:1.

Сравнительную оценку эффективности ОФ проводили путем изучения их влияния на кинетические параметры зародышеобразования сульфата кальция ( $Re = 12500$ ,  $t = 40$  °C), позволяющих с высокой степенью вероятности, сопоставить их между собой [12].

Значение кинетических параметров зародышеобразования ( $\sigma$  – удельная поверхностная энергия,  $r$  – радиус критического зародыша,  $n$  – порядок реакции зародышеобразования) рассчитывали по уравнениям Гиббса – Фольмера:

$$\beta = A \exp \left[ -\frac{16\pi\sigma^3 M^2}{3R^3 T^3 \rho^2 \ln^2 S} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная работа по образованию зародыша критического размера (удельная поверхностная энергия), мДж/м<sup>2</sup>;  $M$  – молекулярная масса кристаллизующейся соли;  $R$  – универсальная газовая постоянная Дж/моль·К;  $T$  – температура, К;  $\rho$  – плотность соли, г/см<sup>3</sup>;  $S$  – относительное пересыщение, равное отношению начальной концентрации к равновесной;

Оствальда – Фрейндлиха:

$$r = \frac{2\sigma M}{RT \ln S}, \quad (2)$$

Христиансена – Нильсена:

$$\beta = k \Delta C^n, \quad (3)$$

где  $\Delta C = C_{\text{исх}} - C_p$ ,  $n$  – порядок реакции,  $k$  – константа скорости.

Взаимосвязь скорости зародышеобразования ( $\beta$ ) и периода индукции ( $t_{\text{ind}}$ ) может быть представлена в виде (4):

$$\beta = \frac{1}{t_{\text{ind}}}, \quad (4)$$

После подстановки в уравнения и логарифмирования получим (5, 6):

$$\ln t_{\text{ind}} = \ln A + \left[ \frac{16\pi\sigma^3 M^2}{3R^3 T^3 \rho^2 \ln^2 S} \right], \quad (5)$$

$$\ln t_{\text{ind}} = \ln k + n \ln C_1. \quad (6)$$

Для одновременного ингибирования минеральных отложений и коррозии изучены комплексоны НТФ и ДПФ, полученные при мольном соотношении ОФ:Ме = 2,5:1, путем растворения соответствующих оксидов в комплексонах НТФ и ДПФ с последующим доведением  $pH$  раствора до 5,5...6,0. Исследования проводили при температуре 70...90 °C и перемешивании ( $Re = 12500$ ), в воде различного минерального состава, мг/дм<sup>3</sup>:

1.  $Ca^{2+} - 526$ ,  $Mg^{2+} - 426$ ,  $Na^+ - 1127$ ,  $HCO_3^- - 871$ ,  $SO_4^{2-} - 1704$ ,  $Cl^- - 2166$ , соответствующей среднестатистическому качеству воды, в системах водопользования (вода высокой минерализации);

2.  $Ca^{2+} - 1,8$ ,  $Na^+ - 84$ ,  $HCO_3^- - 29$ ,  $SO_4^{2-} - 54$ ,  $Cl^- - 73,2$ . Данный минеральный состав характерен для внутренних контуров металлургических предприятий (вода низкой минерализации).  $pH$  растворов 7,2...7,5. Эффективность реагентов в качестве ингибиторов солеотложений и коррозии определялась на установке, описанной в [7].

Для контроля величины коррозии использовали метод измерения линейного поляризационного сопротивления, с помощью коррозиметра «Эксперт-004» [13], с интервалом 20 минут на электродах, изготовленных из Ст3, при общей экспозиции 180 минут (относительная погрешность метода 7%). Эффективность ингибирования солеотложений определяли по количеству карбоната кальция, образовавшегося на «контрольной трубке» по стандартной методике (относительная погрешность метода 3%).

Образование защитной пленки на поверхности металла определяли, в зависимости от экспериментальных условий, методом эллипсометрии (спектральный светодиодный эллипсометр SPEL-7LED). Абсолютная погрешность 1 нм. Ее толщина составляла, в зависимости от экспериментальных условий, 30...400 нм. Анализ состава образующейся пленки выполнен на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo. Осадок массой 5...6 мг растворяли в смеси концентрированных растворах азотной (2 см<sup>3</sup>) и соляной (0,5 см<sup>3</sup>) кислот (объемное соотношение 4:1). Объем дово-

дили до 10 см<sup>3</sup> дистиллированной водой.

### Результаты и их обсуждение

По графику зависимости  $\ln t_{ind} - 1/\ln^2 S$  (рис. 1), при различных концентрациях пересыщенных растворов, были рассчитаны значения  $\sigma$  и  $n$ , а по значению  $\sigma$  – радиус критического зародыша  $r$ .

В табл. 1, приведены рассчитанные значения параметров зародышеобразования для исследуемых реагентов.

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что с увеличением количества функциональных групп в молекуле реагента (МИДФ-НТФ-ЭДФ) и длины углеводородного радикала, соединяющего аминодиметилфосфоновые группы (ЭДФ-ДПФ-ГМДФ), растут кинетические параметры зародышеобразования и, соответственно, снижается расход реагента.

В перспективе, это можно рассматривать как возможность снижения расхода ОФ для одновременного ингибирования солеотложений и коррозии. Однако структуры ГМДФ могут образовывать биядерный комплекс, содержащий два остатка иминодифосфоновой кислоты, разделенных гексаметиловым мостиком. Это обстоятельство существенно влияет на эффективность его использования в качестве ингибитора коррозии. Кроме того, при используемых для одновременного ингибирования солеотложений и коррозии концентраций ОФ 15...100 мг/дм<sup>3</sup>, нивелируется эффективность их применения в зависимости от состава и строения.

С учетом этого, в табл. 2, 3 представлены сравнительные результаты ингибирования солеотложений и коррозии магниевыми и цинковыми комплексонатами НТФ, ДПФ и ОЭДФ в диапазоне температур 70...90 °С, на воде высокой (табл. 2) и низкой (табл. 3) минерализаций.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что использование как цинковых, так и магниевых комплексонов в исследуемом диапазоне температур позволяет снизить количество образовавшихся отложений более чем в 10 раз (эффективность ингибирования >90%), что обусловлено наличием в составе композиции свободного ОФ, обеспечивающего ингибирование

солеотложений.

Также снижается и величина общей коррозии, особенно заметно – с ростом концентраций до 50 мг/дм<sup>3</sup> и температуры до 90 °С. При этом снижение величины коррозии, в присутствии комплексонов цинка и магния, составляет 4...6 % на каждые 10 °С, в то время как величина коррозии в контрольных опытах увеличивается в среднем на 6,3% на каждые 10 °С.

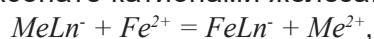
Из данных, представленных в табл. 3, видно, что величина коррозии в контрольных опытах так же, как и для воды высокой минерализации, возрастает на 10...15% на каждые 10 °С.

В присутствии цинковых и магниевых комплексонов наблюдается снижение величины коррозии. Как и в случае высокой минерализации, с ростом температуры величина коррозии уменьшается. По нашему мнению, это может служить косвенным подтверждением образования защитной пленки на поверхности металла, которая, по мнению авторов [14], состоит из гетерокомплексов органо-неорганических координационных полимеров. Очевидно, что скорость ее образования зависит от исходной концентрации, времени экспозиции и температуры.

На фотографиях (рис. 2) представлен внешний вид индикаторных электродов после экспозиции.

С целью проверки данного предположения, на рис. 3 представлены измерения величины коррозии в контрольных опытах и в присутствии магниевого комплекса НТФ, при температурах 70...90 °С (время экспозиции 180 минут).

Из рис. 3 видно, что если в контрольных опытах, в течение всей экспозиции, наблюдается устойчивый рост величины коррозии, то в присутствии магниевого комплекса НТФ, наблюдается снижение величины коррозии (равновесные значения величины коррозии достигаются в пределах 100...120 минут). Это подтверждает теоретические положения Ю.И. Кузнецова и сотрудников [15] о возможном механизме ингибирования ее величины, вследствие электрофильного замещения металла в комплексоноват катионами железа:





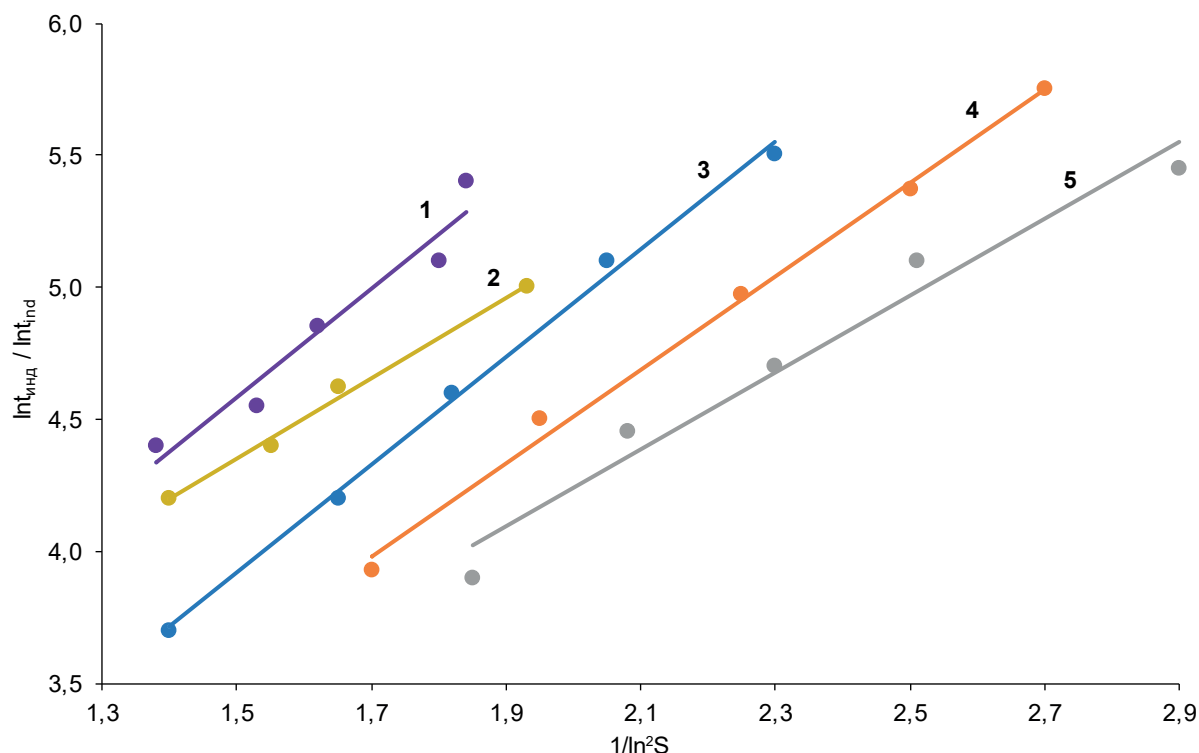


Рис. 1. Определение удельной поверхностной энергии зародышеобразования сульфата кальция в присутствии: 1 – ГМДФ; 2 – ДПФ; 3 – ЭДФ; 4 – АТМФ; 5 – МИДФ ( $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 1. Determination of the specific surface energy of calcium sulfate nucleation in the presence of: 1 – GMDTF; 2 – DPF; 3 – EDTF; 4 – ATMP; 5 – MIDF ( $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Таблица 1. Влияние органофосфонатов на кинетические параметры

Table 1. Effect of organophosphonates on kinetic parameters

Реагент / Reagent	Концентрация реагента, мг/л / Concentration mg/l	Порядок реак- ции зародыше- образования, $n$ / The order of the nucleation reaction, $n$	Удельная поверхностная энергия, $\sigma$ , МДж/м <sup>2</sup> / Specific surface energy, $\sigma$ , MJ/m <sup>2</sup>	Радиус крити- ческого заряда, $r$ , нм / Radius of the critical charge, $r$ , nm
-	-	5,5	7,3	3,8...6,0
МИДФ	1,0	5,7	7,9	4,2...6,0
НДФ	1,0	6,0	8,3	4,3...6,2
ЭДФ	1,0	8,2	9,8	5,1...6,4
ДФ	0,7	13,3	12,8	6,7...8,0
ГМДФ	0,25	14,1	13,3	6,8...8,3

Таблица 2. Ингибирование солеотложений и коррозии

Table 2. Inhibition of salt deposition and corrosion

Среда / Medium	Температура, °C / Temperature, °C	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup> / Concentration, mg/dm <sup>3</sup>	Скорость коррозии, мкм/год / Corrosion rate, mkm/year	Эффективность ингибирования коррозии, % / Effectiveness of corrosion inhibition, %	Количество отложений, мг / Amount of deposits, mg	Эффективность ингибирования солеотложений, % / The effectiveness of salt deposition inhibition, %
Контроль / Control experiment	70	–	570	–	45,4	–
	80		610	–	47	–
	90		650	–	47,2	–
НТФ-Mg	70	30	100	82,5	3,4	92,5
	80		60	90,2	3,3	93,0
	90		50	92,3	3	93,6
	70	50	50	91,2	3,4	92,5
	80		50	91,8	3,5	92,6
	90		40	93,9	3,6	92,4
НТФ-Zn	70	30	130	77,2	4,4	90,3
	80		120	80,3	4	91,5
	90		90	86,2	4	91,5
	70	50	80	86,0	4	91,2
	80		80	86,9	4,1	91,3
	90		80	87,7	4	91,5
ДПФ:Mg	70	30	120	79,0	4,5	90,1
	80		100	83,6	4	91,5
	90		80	87,7	4,1	91,3
	70	50	90	84,2	4	91,2
	80		80	86,9	4,3	90,9
	90		50	92,3	3,6	92,4
ДПФ:Zn	70	30	130	77,2	4,6	89,9
	80		110	82,0	4,1	91,3
	90		80	87,7	3,9	91,7
	70	50	110	80,7	4,1	92,0
	80		90	85,3	4	91,5
	90		80	87,7	4,1	91,3

Таблица 3. Ингибирование солеотложений и коррозии

Table 3. Inhibition of salt deposition and corrosion

Среда / Medium	Температура, °C / Temperature, °C	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup> / Concentration, mg/dm <sup>3</sup>	Скорость коррозии, мкм/год / Corrosion rate, mkm/year	Эффективность ингибирования коррозии, % / Effectiveness of corrosion inhibition, %
Контроль / Control experiment	70	-	390	-
	80		440	-
	90		530	-
НТФ-Mg	70	30	80	79,5
	80		80	81,8
	90		70	86,8
ОЭДФ-Zn	70	30	50	87,2
	80		50	88,6
	90		40	92,5



a

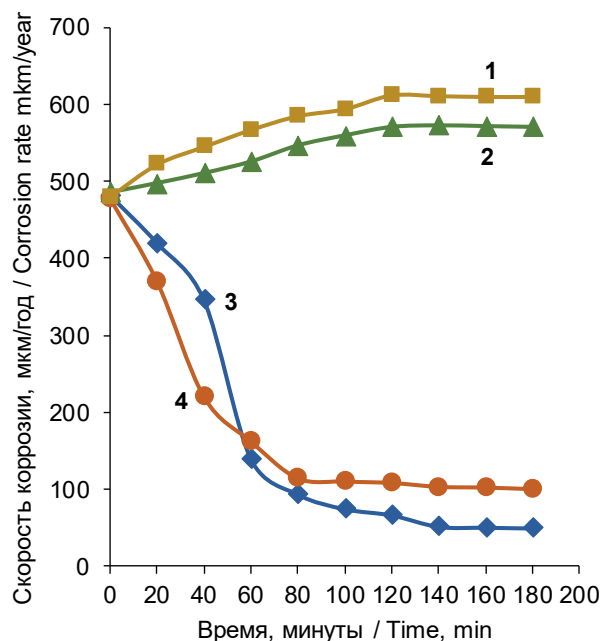


b

Рис. 2. Индикаторные электроды после экспозиции (вода высокой минерализации):  
a – Mg-НТФ (90 °C), b – контрольный опыт (90 °C)

Fig. 2. Indicator electrodes after exposure (high mineralization water):  
a – Mg-ATMP (90 °C), b – control experiment (90 °C)

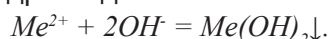




**Рис. 3. Зависимость величины коррозии от времени. Концентрация реагентов – 30 мг/дм<sup>3</sup>: 1 – контрольный опыт (90 °C), 2 – контрольный опыт (70 °C), 3 – Mg-НТФ (70 °C), 4 – Mg-НТФ (90 °C)**

**Fig. 3. Dependence of the corrosion value on time. Reagent concentration – 30 mg/dm<sup>3</sup>: 1 – control experiment (90 °C), 2 – control experiment (70 °C), 3 – Mg-ATMP (70 °C), 4 – Mg-ATMP (90 °C)**

и последующим связыванием катиона металла в гидроксид:



Близкую эффективность ингибирования коррозии комплексонами цинка и магния (табл. 2) подтверждают значения  $PP_{Zn(OH)_2} = 1,4 \cdot 10^{-17}$ ,  $PP_{Mg(OH)_2} = 7,1 \cdot 10^{-12}$  и анализом осадка (при использовании магниевого комплекса НТФ), образовавшегося на электродах, %:  $P - 15,72$  (в пересчете на НТФ – 50,54),  $Fe - 14,52$ ,  $Mg - 0,11$ , что соответствует мольному соотношению НТФ:Fe = 1,5:1.

### Выводы

Проведен сопоставительный анализ эффективности защитного действия ингибиторов солеотложений и коррозии на основе ОФ различного химического состава и строения и их комплексонов с цинком и магнием.

Установлено, что с ростом количества функциональных групп в молекуле реагента

и увеличении длины углеводородного радикала, соединяющего аминотриэтилфосфоновые группы, наблюдается рост кинетических параметров зародышеобразования и, соответственно, эффективность, и снижение количества реагента.

В данных экспериментальных условиях (состав воды, мг/дм<sup>3</sup>): 1)  $Ca^{2+} - 526$ ,  $Mg^{2+} - 426$ ,  $Na^+ - 1127$ ,  $HCO_3^- - 871$ ,  $SO_4^{2-} - 1704$ ,  $Cl^- - 2166$ ; 2)  $Ca^{2+} - 1,8$ ,  $Na^+ - 84$ ,  $HCO_3^- - 29$ ,  $SO_4^{2-} - 54$ ,  $Cl^- - 73$ ; температура 70...90 °C; материал Ст3. В качестве ингибиторов солеотложений и коррозии испытаны цинковые и магниевые комплексоны, полученные при мольном соотношении 2,5:1 (ОФ:Me). Установлено, что по своей эффективности магниевые не уступают цинковым. В присутствии комплексонов, с ростом температуры, снижается величина коррозии. Это обусловлено образованием защитной пленки на поверхности металла.

Образование защитной пленки подтверждается результатами эллипсометрических исследований (спектральный светодиодный эллипсометр SPEL-7LED) и результатами элементного анализа (атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo). В состав защитной пленки входит комплексонат железа (мольное соотношение близкое 1,5:1) и гидроксид магния.

### Литература

1. Zuo, Y., Sun, Y., Yang, W., Zhang, K., Chen, Y., Yin, X., & Liu, Y. Performance and mechanism of 1-hydroxy ethylidene-1,1-diphosphonic acid and 2-phosphonobutane-1,2,4-tricarboxylic acid in the inhibition of calcium carbonate scale // Journal of Molecular Liquids. – 2021. – V. 334. – 116093. doi:10.1016/j.molliq.2021.116093
2. Ji, Y., Chen, Y., Le, J., Qian, M., Huan, Y., Yang, W. [et al.] Highly effective scale inhibition performance of amino trimethylenephosphonic acid on calcium carbonate // Desalination and Water Treatment. – 2017. – V. 422. – P. 165-173. doi:10.1016/j.desal.2017.08.027
3. De Moraes, S.C., Bezerra, B.G.P., Castro, B.B., & Balaban, R. de C. Evaluation of polyelectrolytic complexes based on poly(epichlorohydrin-co-dimethylamine) and poly(4-styrene-sulfonic acid-co-maleic acid) in the delivery of polyphosphates for the con-

trol of  $\text{CaCO}_3$  scale in oil wells // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – V. 339. – 116757. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116757

4. Linnikov O.D., Driker B.N., Tarantaev A.G., & Murashova, A.I. Prevention of scaling and corrosion by reagent KISK-1 // *Desalination and Water Treatment*. – 2015. – V. 57, № 43. – P. 20141-20145. doi: 10.1080/19443994.2015.1107508

5. Umoren S.A., Solomon M.M. (2017). Synergistic corrosion inhibition effect of metal cations and mixtures of organic compounds: A Review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2017. – V. 5, № 1. – P. 246-273. doi: 10.1016/j.jece.2016.12.001

6. Kuznetsov, Yu.I., Chirkunov, A.A., and Filippov, I.A. (2013). The effect of steel modifying with zinc oxyethylidenediphosphonate on its passivation in solutions of certain inhibitors, Russ. // *J. Electrochem.* – 2013. – V. 49, № 12. – 1107. doi: 10.1134/S1023193513120045

7. Tsirulnikova N.V., Driker B.N., Fetisova T.S., Protazanov A.A., Kuznetsov Yu.I. Mg(II) and Zn(II) complexonates with a 1,3-diamino-2-propanol phosphorus-containing derivative as corrosion and scaling inhibitors. // *Int. J. Corros. Scale Inhibit.* – 2020. – V. 9, № 1. – P. 362-371. doi: 10.17675/2305-6894-2020-9-1-24

8. Moschona A., Plesu N., Colodrero R.M.P., Cabeza A., Thomas A.G., Demadis K. D. (2020). Homologous alkyl side-chain diphosphonate inhibitors for the corrosion protection of carbon steels. // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – 6864. doi: 10.1016/j.cej.2020.126864

9. Дрикер Б.Н., Протазанов А.А., Цирульникова Н.В., Горбатенко Ю.А. Ингибирование коррозии конструкционных сталей (Ст3) // *Практика противокоррозионной защиты*. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 40-47. doi: 10.31615/j.corros. prot. 2020.98.4-5

10. Rajendran S., Joany R.M. et al. Corrosion inhibition by carboxymethyl cellulose-1-hydroxyethane-1,1diphosphonic acid- $\text{Zn}^{2+}$  system // *Bulletin of Electrochemistry*. – 2002. – V. 18, № 1. – P. 25-28.

11. Rajendran S., Amalraj A.F. et al. Mutual influence of HEDP and SDS- $\text{Zn}^{2+}$  system on corrosion inhibition of carbon steel // *Transactions of the SAEST*. – 2005. – V. 40, № 1. – P. 35-39.

12. Дрикер Б.Н., Мурашова А.И., Тарантаев А.Г. Методология выбора ингибитора солейотложений и коррозии // *LAP LAMBERT*

Academic Publishing. – 2015. – 42.

13. Ануфриев Н.Г., Комарова Е.Е., Смирнова Н.Е. Универсальный коррозиметр для научных исследований и производственного контроля коррозии металлов и покрытий // *Коррозия: материалы, защита*. – 2004. – № 1. – С. 42-47.

14. Chausov F.F., Somov N.V., Zakirova R.M. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2017. – V. 81, № 3. – P. 394-396. doi: 10.7868/S0367676517030085.

15. Кузнецов Ю.И., Раскольников А.Ф. Ингибирование коррозии железа нитрилтриметилфосфонатными комплексами // *Защита металлов*. – 1992. – Т. 28, № 2. – С. 249-256.

### References

1. Zuo, Y., Sun, Y., Yang, W., Zhang, K., Chen, Y., Yin, X., & Liu, Y. (2021). Performance and mechanism of 1-hydroxy ethylidene-1,1-diphosphonic acid and 2-phosphonobutane-1,2,4-tricarboxylic acid in the inhibition of calcium carbonate scale. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116093. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116093

2. Ji, Y., Chen, Y., Le, J., Qian, M., Huan, Y., Yang, W. [et al.] (2017). Highly effective scale inhibition performance of amino trimethylenephosphonic acid on calcium carbonate. *Desalination*, 422, 165-173. doi: 10.1016/j.desal.2017.08.027

3. De Moraes, S. C., Bezerra, B. G. P., Castro, B. B., & Balaban, R. de C. (2021) Evaluation of polyelectrolytic complexes based on poly(epichlorohydrin-co-dimethylamine) and poly (4-styrene-sulfonic acid-co-maleic acid) in the delivery of polyphosphates for the control of  $\text{CaCO}_3$  scale in oil wells. *Journal of Molecular Liquids*, 339, 116757. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116757

4. Linnikov, O. D., Driker, B. N., Tarantaev, A. G., & Murashova, A. I. (2015). Prevention of scaling and corrosion by reagent KISK-1. *Desalination and Water Treatment*, 57(43), 20141-20145. doi:10.1080/19443994.2015.1107508 (in Russ.).

5. Umoren, S. A., Solomon, M. M. (2017). Synergistic corrosion inhibition effect of metal cations and mixtures of organic compounds: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 246-273. doi: 10.1016/j.jece.2016.12.001

6. Kuznetsov, Yu. I., Chirkunov, A. A., & Filippov, I. A. (2013). The effect of steel modifying with zinc oxyethylidenediphosphonate on its passivation in solutions of certain inhibitors, *Russ. J. Electrochem*, 49(12), 1107. doi: 10.1134/S1023193513120045 (in Russ.).
7. Tsiurlikova, N. V., Driker, B. N., Fetisova, T. S., Protazanov, A. A., & Kuznetsov, Yu. I. (2020). Mg(II) and Zn(II) complexonates with a 1,3-diamino-2-propanol phosphorus-containing derivative as corrosion and scaling inhibitors. *Int. J. Corros. Scale Inhibit.* 9(1), 362-371. doi: 10.17675/2305-6894-2020-9-1-24 (in Russ.).
8. Moschona, A., Plesu, N., Colodrero, R. M. P., Cabeza, A., Thomas, A. G., & Demadis, K. D. (2020). Homologous alkyl side-chain diphosphonate inhibitors for the corrosion protection of carbon steels. *Chemical Engineering Journal*, 126864. doi: 10.1016/j.cej.2020.126864
9. Driker, B. N., Protazanov, A. A., Tsiurlikova, N. V., & Gorbatenko, Yu. A. (2020). Corrosion inhibition of structural steels (St3). *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 25(4), 40-47. (in Russ.).
10. Rajendran, S., Joany, R. M. et al. (2002). Corrosion inhibition by carboxymethyl cellulose-1-hydroxyethane-1,1diphosphonic acid-Zn<sup>2+</sup> system. *Bulletin of Electrochemistry*. 18(1), 25-28.
11. Rajendran, S., Amalraj, A. F. et al. (2005). Mutual influence of HEDP and SDS-Zn<sup>2+</sup> system on corrosion inhibition of carbon steel. *Transactions of the SAEST*, 40(1), 35-39.
12. Driker, B. N., Murashova, A. I., & Tarantaev, A. G. (2015). Methodology for the selection of an inhibitor of salt deposits and corrosion. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 42. (in Russ.).
13. Anufriev, N. G., Komarova, E. E., & Smirnova, N. E. (2004). Universal corrosion meter for scientific research and industrial control of corrosion of metals and coatings. *Corrosion: materials, protection*, 1, 42-47. (in Russ.).
14. Chausov, F. F., Somov, N. V., Zakirova, R. M. et al. (2017). Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 81(3), 394-396. doi: 10.7868/S0367676517030085.
15. Kuznetsov, Yu. I., Raskolnikov, A. F. (1992). Inhibition of iron corrosion by nitriltrimethylphosphonate complexes. *Protection of metals*, 28(2), 249-256. (in Russ.).

#### Информация об авторах

**Дрикер Борис Нутович**, д.т.н., профессор, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Протазанов Афанасий Андреевич**, аспирант 2 курса, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Цирульникова Нина Владимировна**, д.х.н., гл.н.с., Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт – ИРЕА»), г. Москва, Российская Федерация

**Стягов Николай Николаевич**, студент 4 курса бакалавриата, Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

#### Information about authors

**Boris N. Driker**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural State Forestry University, Yekaterinburg, Russian Federation

**Afanasii A. Protazanov**, postgraduate, Ural State Polytechnic University, Yekaterinburg, Russian Federation

**Nina V. Tsiurlikova**, Doctor of Chemistry, principal researcher, Institute of Chemical Reagents and Especially Pure Chemicals of the National Research Center «Kurchatov Institute» (SIC «Kurchatov Institute – IREA»), Moscow, Russian Federation

**Nikolay N. Styagov**, undergraduate, Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation





**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4

**Защитная эффективность омепразола  
против сероводородной коррозии углеродистой стали**

Л.Е. Цыганкова<sup>1✉</sup>, В.А. Брыксина<sup>1</sup>, О.А. Алехина<sup>1</sup>, Н.В. Шель<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
РФ, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33

<sup>2</sup>Тамбовский государственный технический университет,  
РФ, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106

e-mail: vits21@mail.ru

**Аннотация.** Просроченные лекарства изучаются в качестве ингибиторов коррозии металлов в различных средах более 10 лет. Подобное их использование обусловлено структурой молекул, содержащих ненасыщенные связи, ароматические кольца и гетероатомы, такие, как O, N, S и др., как и обычные органические ингибиторы. В данной работе исследован ингибирующий эффект просроченного лекарства Омепразол по отношению к коррозии углеродистой стали в модели пластовой воды NACE, содержащей 400 мг/л сероводорода. Концентрация омепразола варьировала в пределах 10...60 мг/л. Исследования проведены методами гравиметрии, потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии. Ингибиторные свойства омепразола в исследуемой среде оцениваются как средние с величиной защитного эффекта 75...80% при максимальной исследованной концентрации. Ингибитор вызывает замедление обеих электродных реакций. Адсорбция омепразола на поверхности стали описывается изотермой Ленгмюра. Рассчитанная величина свободной энергии адсорбции (29 кДж/моль) свидетельствует о хемосорбции ингибитора.

**Ключевые слова:** просроченное лекарство, омепразол, углеродистая сталь, коррозия, ингибирование, адсорбция, сероводородная среда.

**Для цитирования:** Цыганкова Л.Е., Брыксина В.А., Алехина О.А., Шель Н.В. Защитная эффективность омепразола против сероводородной коррозии углеродистой стали // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 36-44. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4

Статья получена: 16.05.2022, опубликована 01.12.2022.

**Protective efficacy of omeprazole against hydrogen sulfide  
corrosion of carbon steel**

L.E. Tsygankova<sup>1✉</sup>, V.A. Bryksina<sup>1</sup>, O.V. Alekhina<sup>1</sup>, N.V. Shel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Derzhavin State University,  
33, Internatsyonalnaya st., Tambov, 392000, Russian Federation

<sup>2</sup>Tambov State Technical University,  
106, Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation

e-mail: vits21@mail.ru

**Abstract.** Expired drugs have been studied as corrosion inhibitors for metals in various environments for more than 10 years. Their similar use is due to the structure of molecules containing unsaturated bonds, aromatic rings and heteroatoms, such as O, N, S, etc., as well as conventional organic inhibitors. In this work, the inhibitory effect of expired drug Omeprazole against carbon steel corrosion in a NACE model stratum water containing 400 mg/L hydrogen sulfide was investigated. The concentration of omeprazole varied within 10...60 mg/L. The studies were carried out by gravimetry, potentiodynamic polarization and impedance spectroscopy methods. The inhibitory properties of omeprazole in the studied medium are estimated as average with a protective effect of 75...80% at the maximum concentration studied. The inhibitor causes a slowdown in both electrode reactions. The adsorption of omeprazole on the steel surface is described by the Langmuir isotherm. The calculated value of the free energy of adsorption (-29 kJ/mol) indicates the chemisorption of the inhibitor.

**Keywords:** expired drug, omeprazole, carbon steel, corrosion, inhibition, adsorption, hydrogen sulfide environment.

**For citation:** Tsygankova, L. E., Bryksina, V. A., Alekhina, O. V. & Shel, N. V. (2022). Protective efficacy of omeprazole against hydrogen sulfide corrosion of carbon steel. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27 (4), 36-44. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4

Received: May 16, 2022. Published: December 01, 2022

## Введение

Ингибиторная защита металлов от коррозии широко используется в различных агрессивных средах, в том числе в средах нефтедобычи и нефтепереработки, для которых характерно присутствие сероводорода, весьма агрессивного стимулятора коррозии. Известно, что наиболее эффективными ингибиторами коррозии являются органические соединения, молекулы которых содержат ненасыщенные связи, ароматические кольца и гетероатомы, такие, как *O*, *N*, *S* и др. Многие просроченные лекарства характеризуются подобными структурами и могут быть использованы в качестве ингибиторов коррозии металлов. Использование органических ингибиторов коррозии ограничено в связи с усилением природоохранного законодательства во всем мире. Поэтому растет спрос на "зеленые" ингибиторы коррозии, которые защищают металлы и сплавы с низким уровнем риска для окружающей среды. Лекарства являются наиболее важными альтернативными кандидатами для защиты металлов от коррозии. Исследование их применения с этой целью проводится уже в течение более десяти лет. Опубликован ряд обзоров по ингибирующим свойствам просроченных лекарств [1-3]. В [1] описано более 10 лекарств, использованных в качестве ингибиторов коррозии мягкой и углеродистой стали, алюминия и цинка в растворах серной и соляной кислот. Они имеют гетероатомы или ароматические кольца в структуре молекул. Исследования были проведены методами гравиметрии, потенциодинамической поляризации, электрохимической импедансной спектроскопии и линейного поляризационного сопротивления. Концентрация разных лекарств варьировала в пределах 50...900 ppm. Защитный эффект составлял от 75 до 97%. В [2] приводятся данные по ингибирующей способности 30 лекарств против коррозии мягкой стали, *Al*, *Zn* и меди в кислых растворах. Отмечается, что адсорбция лекарств на стали в большинстве случаев подчиняется изотерме Ленгмюра и лишь в редких случаях – изотерме Темкина. Концентрация ингибиторов составляла 100...600 ppm, их защитный эффект варьировал в пределах 80...97%. В обзоре [3] анализируются эко-

логически безопасные ингибиторы коррозии, в том числе аминокислоты, лекарства, растительные экстракты, ионные жидкости и др. Приводятся данные по защитной эффективности ряда лекарств по отношению к мягкой стали, алюминию, цинку в растворах серной, соляной и фосфорной кислот. Отмечается их достаточно высокая защитная эффективность. В работе [4] сопоставлена защитная эффективность лекарств Sulfadoxine-Pyrimethamine и промышленного ингибитора по отношению к коррозии трубной стали в нефтяной пластовой воде. Исследования проведены с использованием гравиметрического метода, потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии. Авторы приняли без доказательств блокировочный механизм действия ингибиторов. Адсорбция ингибиторов описана посредством изотермы Ленгмюра. Оба ингибитора проявили аналогичную защитную эффективность, близкую к 80% при концентрации 0,01 *M*. Опубликованы данные по ингибиторной эффективности просроченного лекарства Desloratidine по отношению к углеродистой стали в 1 *M HCl*, которая составила 92% при концентрации  $19,3 \cdot 10^{-5}$  *M* [5]. В [6] приведены данные по защитной способности Pantoprazole по отношению к коррозии мягкой стали в 1 *M* растворе  $H_2SO_4$ , которая, согласно потенциодинамической поляризации, составила 94% при концентрации 250 ppm. Pantoprazole является ингибитором смешанного типа. В [7] исследован ингибирующий эффект просроченного лекарства Omeprazole по отношению к стали в 1 *M* растворе  $H_3PO_4$  методами гравиметрии, потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии. Согласно данным гравиметрии, защитный эффект Omeprazole составляет около 75% при концентрации  $5 \cdot 10^{-5}$  *M* (17,27 мг/л) и 94% при концентрации  $7 \cdot 10^{-4}$  *M* (241,8 мг/л). По данным потенциодинамической поляризации, ингибитор вызывает замедление обеих парциальных электродных реакций с преобладанием катодного торможения.

Защитная эффективность Omeprazole была исследована также нами по отношению к углеродистой стали в 1 *N* растворах *HCl* и  $H_2SO_4$  [8]. По данным гравиметрии, защитная эффективность омепразола состав-

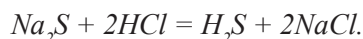
ляет около 90% при концентрации 40 мг/л. С использованием импедансной спектроскопии было рассчитано  $-ΔG_{oads}$  ингибитора, которое оказалось равной 29,3 и 28,3 кДж/моль соответственно в растворах серной и соляной кислот. Представляет интерес исследование защитных свойств омепразола против сероводородной коррозии углеродистой стали.

Целью данной работы является исследование защитных свойств омепразола по отношению к углеродистой стали в модели пластовой воды, характерной для сред нефте-газодобычи, содержащей 400 мг/л  $H_2S$ .

### Методика эксперимента

Гравиметрические коррозионные испытания и электрохимические измерения проводились в модели пластовой воды NACE (г/л:  $NaCl$  – 5;  $CH_3COOH$  – 0,25), используемой в Национальной Ассоциации инженеров-коррозионистов США, с добавкой 400 мг/л  $H_2S$  на образцах стали Ст3 с составом, масс. %:  $C$  – 0,2;  $Mn$  – 0,5;  $Si$  – 0,15;  $P$  – 0,04;  $S$  – 0,05;  $Cr$  – 0,30;  $Ni$  – 0,20;  $Cu$  – 0,20;  $Fe$  – 98,36.

Сероводород получали непосредственно в рабочем растворе, для чего вводили рассчитанные количества  $Na_2S$  и  $HCl$ , соответствующие уравнению:



Концентрация сероводорода контролировалась йодометрически. Продолжительность коррозионных опытов составляла сутки. Защитный эффект ингибитора ( $Z$ ) рассчитывался по данным гравиметрических коррозионных испытаний (1) и по результатам поляризационных измерений (2):

$$Z = 100 \left[ (K_0 - K_{inh}) / K_0 \right], \quad (1)$$

$$Z = 100 \left[ (i_0 - i_{inh}) / i_0 \right], \quad (2)$$

где  $K_0(i_0)$  и  $K_{inh}(i_{inh})$  – скорость коррозии в отсутствие и в присутствии ингибитора в растворе соответственно. Токи коррозии ( $i_0, i_{inh}$ ) рассчитывались на основе экстраполяции тафелевских участков поляризационных кривых на потенциал коррозии.

В качестве ингибитора исследовали просроченное лекарство омепразол(RS)-5-ме-

токси-2-[(4-метокси-3,5-диметилпиридин-2-ил)метилсульфинил]-1H-бензимидазол ( $M = 345,417$  г/моль), структурная формула которого приведена на рис. 1.

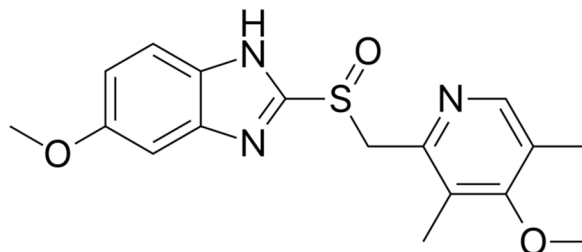


Рис. 1. Структурная формула омепразола

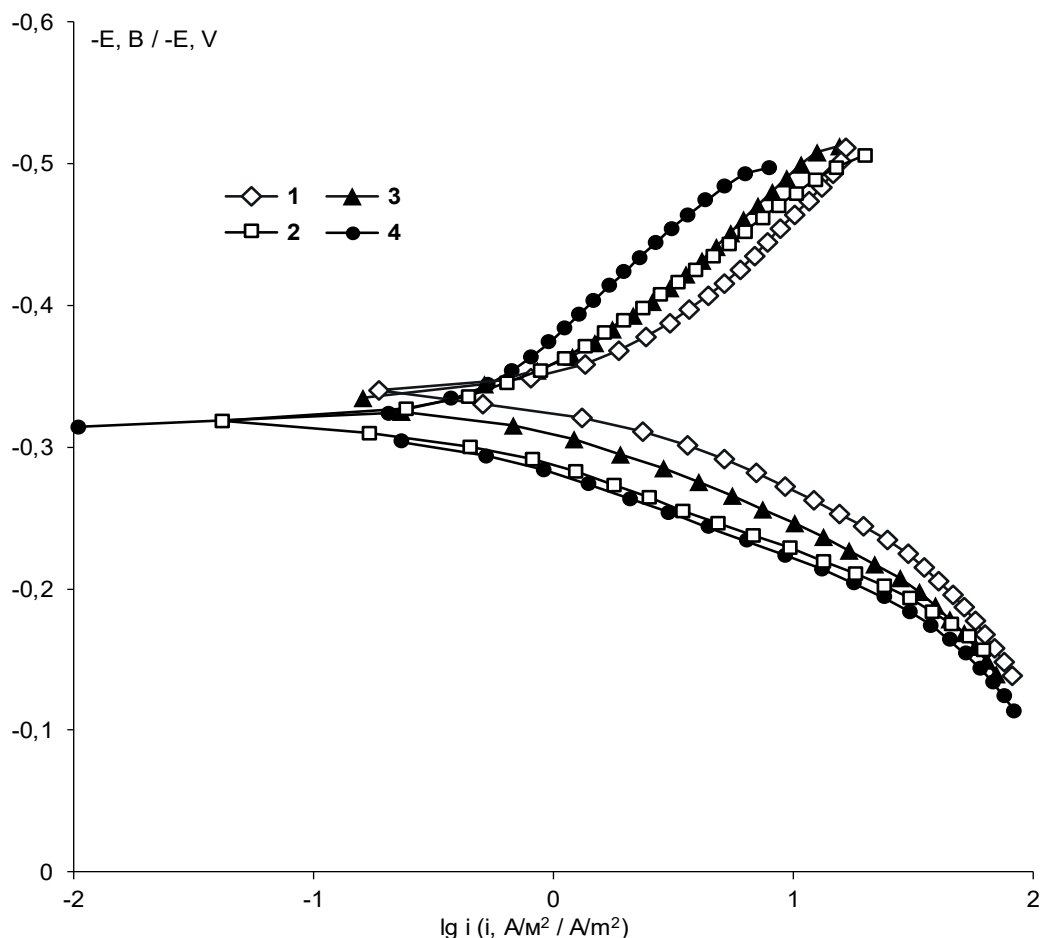
Fig. 1. Structural formula of Omeprazole

Концентрация ингибитора варьировалась в пределах 10...60 мг/л.

Поляризационные потенциодинамические (скорость наложения потенциала 0,66 мВ/с) кривые измерены на электродах в исследуемых растворах в трехэлектродной ячейке с разделенными анодным и катодным пространствами с использованием потенциостата IPC-ProMF производства ИФХЭ имени А. Н. Фрумкина РАН. Потенциалы измерены относительно насыщенного хлорид-серебряного электрода и пересчитаны на нормальную водородную шкалу. Противоелектрод – гладкая платина.

Спектры импеданса изучали в диапазоне частот ( $\omega/2\pi$ ) 10 кГц ... 0,05 Гц с амплитудой переменного напряжения 10 мВ, используя электрохимический измерительный комплекс фирмы Solartron (Великобритания), состоящий из анализатора импеданса SI 1255 и потенциостата SI 1287. Обработку результатов измерения импеданса проводили по программе ZView 3.0, позволяющей проводить расчеты по любым эквивалентным схемам с числом элементов до 20. Во избежание ситуации нахождения локального минимума функции расчет повторяли несколько раз с различными начальными значениями элементов схемы. Критерием оценки схем является среднее квадратичное отклонение  $s$ ; эквивалентная схема считается удовлетворительной при  $s \leq 5\%$ .

Рабочие электроды перед опытами шлифовали до 6 класса чистоты и обезжиривали ацетоном.



**Рис. 2. Поляризационные кривые на стальном электроде в растворе NACE + 400 мг/л  $H_2S$  в отсутствие (1) и в присутствии омепразола, мг/л: 2 – 10; 3 – 20; 4 – 40**  
**Fig. 1. Polarization curves on a steel electrode in a solution of NACE + 400 mg/l  $H_2S$  in the absence (1) and in the presence of omeprazole, mg/L: 2 – 10; 3 – 20; 4 – 40**

### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены поляризационные

кривые, полученные в исследуемом растворе в отсутствие и в присутствии ингибитора, а в табл. 1 рассчитанные на их основе ки-

**Таблица 1. Кинетические параметры стального Ст3 электрода в исследуемом растворе в отсутствие и в присутствии омепразола и его защитная эффективность**

**Table 1. Kinetic parameters of the steel St3 electrode in the test solution in the absence and presence of omeprazole and its protective effectiveness**

$c_{инг}, \text{мг/л}$ / $c_{inh}, \text{mg/L}$	$-E_{кор}, \text{В}$ / $-E_{cor}, \text{V}$	$i_{кор}, \text{А/м}^2$ / $i_{cor}, \text{A/m}^2$	$b_a, \text{В}$ / $b_a, \text{V}$	$b_k, \text{В}$ / $b_c, \text{V}$	$Z, \%$
Фон / Background	0,34	0,76	0,060	0,110	-
10	0,32	0,28	0,060	0,110	63
20	0,33	0,27	0,060	0,110	65
40	0,31	0,15	0,060	0,150	80



нетические параметры и защитная эффективность омепразола. Из рисунка следует, что омепразол вызывает торможение обеих парциальных электродных реакций, увеличивающееся с ростом его концентрации, что приводит к увеличению защитной эффективности (табл. 1).

Потенциал коррозии в ингибированных растворах смещен в сторону менее отрицательных значений, что говорит о преобладающем торможении анодного процесса.

Защитная эффективность омепразола, по данным гравиметрии, приведена ниже в табл. 2.

Некоторое отличие от результатов поляризационных измерений обусловлено различной продолжительностью соответствующих экспериментов. Сопоставление защитной эффективности омепразола в сероводородной среде с данными в 1 Н

импеданса. Годографы, полученные в исследуемом растворе в отсутствие и в присутствии ингибитора, приведены на рис. 3.

Как видно, диаметр дуг увеличивается с ростом концентрации ингибитора, свидетельствуя об увеличении общего сопротивления в системе и уменьшении скорости коррозии. Это согласуется с данными поляризационных и гравиметрических измерений. Анализ годографов импеданса проведен с применением эквивалентной схемы, использованной ранее в [10] и приведенной на рис. 4.

В табл. 4 приведены численные значения элементов эквивалентной схемы в исследуемых растворах при потенциале коррозии.

Сопротивление переноса заряда в анодной реакции  $R_f$  возрастает с увеличением концентрации ингибитора, что

**Таблица 2. Защитная эффективность омепразола**  
**Table 2. Protective efficacy of Omeprazole**

$c_{инг}$ , мг/л / $c_{inh}$ , mg/L	10	20	30	40	50
Z, %	68,8	69,3	72,5	71,3	75

**Таблица 3. Эффективность ингибиторов коррозии**  
**Table 2. Effectiveness of corrosion inhibitors**

Z, %	$\geq 90$	$75 \leq Z < 90$	$50 \leq Z < 74$	$Z < 50$
Оценка / Rating	Отлично / Excellent	Хорошо / Good	Средне / Moderate	Слабо / Poor

растворах HCl и  $H_2SO_4$  [8] свидетельствует о некотором снижении его эффективности в присутствии  $H_2S$ . Основываясь на системе критериев для оценки эффективности ингибиторов коррозии, предложенной в [9] и представляющей следующую картину (табл. 3), можно оценить эффективность омепразола в сероводородной среде как среднюю при максимальной используемой концентрации в то время, как в 1 Н растворах HCl и  $H_2SO_4$  его оценка «отлично» [8].

Ингибирующая эффективность омепразола исследовалась также с использованием спектроскопии электрохимического

согласуется с преобладающим торможением анодного процесса, согласно данным поляризационных измерений. Емкость двойного электрического слоя  $C_{dl}$  снижается с ростом концентрации омепразола в растворе, что свидетельствует о его адсорбции и позволяет рассчитать степень заполнения поверхности стали ингибитором по формуле 3 [11]:

$$\theta = (A_0 - A) / (A_0 - A_1), \quad (3)$$

где  $C_p$ ,  $C$  и  $C_i$  – емкости двойного электрического слоя в растворе без ингибитора, с

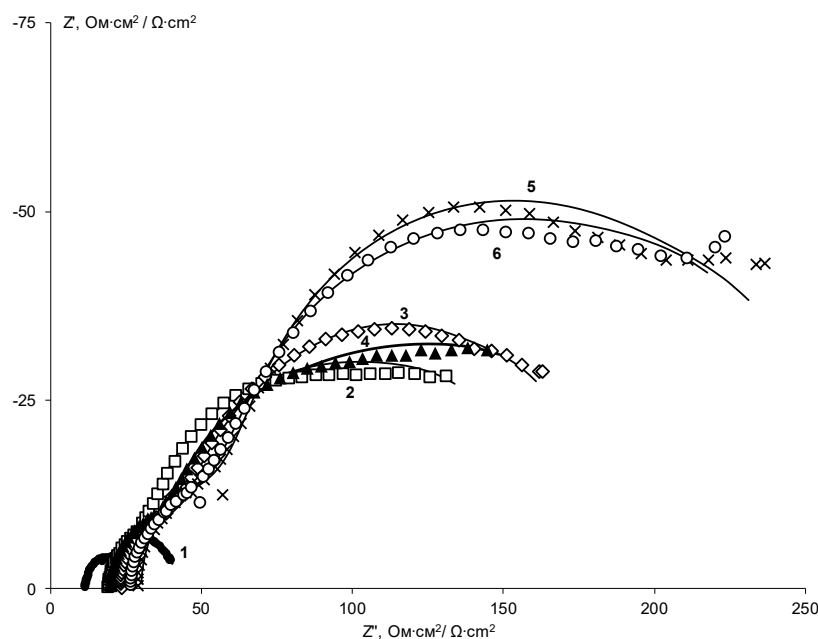


Рис. 3. Диаграмма Найквиста стального электрода в растворе NACE + 400 мг/л  $H_2S$  при потенциале коррозии в отсутствие ингибитора (1) и в его присутствии, мг/л: 2 – 0; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40, 6 – 60

Fig. 3. Nyquist diagram of steel electrode in NACE + 400 mg/L  $H_2S$  solution at corrosion potential in the absence of inhibitor (1) and in its presence, mg/L: 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40, 6 – 60

Таблица 4. Численные значения элементов эквивалентной схемы при  $E_{кор}$  стального электрода в растворе NACE + 400 мг/л  $H_2S$

Table 4. Numerical values of equivalent circuit elements at  $E_{cor}$  of steel electrode in NACE + 400 mg/L  $H_2S$  solution

Параметр / Parameter	Фон / Background	$c_{инг}, \text{мг/л} / c_{inh}, \text{mg/L}$				
		10	20	30	40	60
$R_s, \text{Ом} \cdot \text{см}^2 / \Omega \cdot \text{см}^2$	11,7	19,74	25,5	20,17	30,04	25,63
$C_{dl}, \mu\text{Ф} / \text{см}^2 / \mu\text{F} / \text{см}^2$	156,41	67,32	46,07	27,07	22,63	15,77
$R_1, \text{Ом} \cdot \text{см}^2 / \Omega \cdot \text{см}^2$	32,1	177,7	177,6	215,9	255,5	276,2
$R_2, \text{Ом} \cdot \text{см}^2 / \Omega \cdot \text{см}^2$	9,09	4,27	12,18	3,16	13,30	6,76
$C_a, \mu\text{Ф} / \text{см}^2 / \mu\text{F} / \text{см}^2$	0,75	157,83	0,82	0,93	0,95	0,86
$R_a, \text{Ом} \cdot \text{см}^2 / \Omega \cdot \text{см}^2$	1371	802,3	1246	901,5	1996	1530
$p$	0,59	0,40	0,48	0,36	0,45	0,42
$\tau, \text{с/с}$	94,16	38,64	24,38	64,48	31,82	35,87
$R_a, \text{Ом} \cdot \text{см}^2 / \Omega \cdot \text{см}^2$	9,692	53,05	151,2	121,7	147,2	198,1

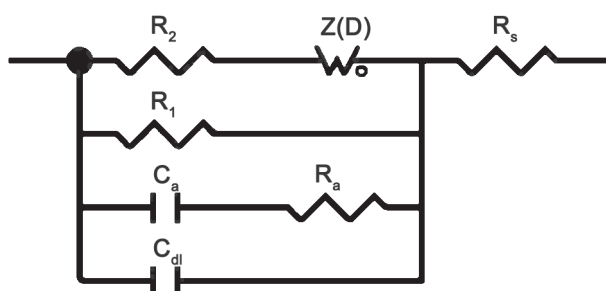


Рис. 4. Эквивалентная схема, моделирующая поведение стального электрода в исследуемых растворах

Fig. 4. Equivalent circuit simulating the behavior of a steel electrode in the studied solutions

ингибитором и при максимальном заполнении поверхности электрода частицами ингибитора соответственно. Величина  $C_l$  рассчитана графически на основании прямолинейной зависимости  $C_{dl} = f(1/C_{unz})$  и равна отрезку, отсекаемому на оси ординат [8].  $C_l = 1 \mu F/cm^2$ .

Рассчитанные величины степени заполнения поверхности ингибитором  $\theta$  приведены ниже:

Для выбора изотермы, соответствующей

$c_{unz}, \text{ мг/л}$ $/ c_{inh}, \text{ мг/л}$	10	20	30	40	60
$\theta$	0,57	0,71	0,83	0,86	0,90

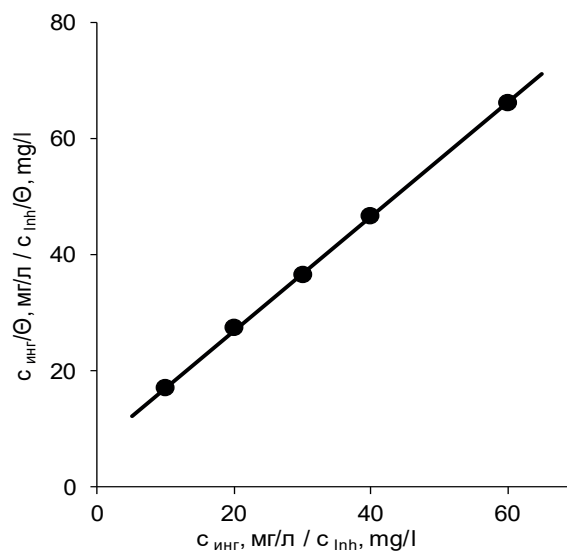
полученным величинам степени заполнения поверхности ингибитором, было проверено их соответствие изотермам Темкина  $Bc = \exp(f\theta)$ , Фрумкина  $Bc = [\theta/(1-\theta)]\exp(-2a\theta)$  и Ленгмюра  $c/\theta = 1/B + c$ , где  $f$  – параметр энергетической неоднородности поверхности металла;  $B$  – константа адсорбционного равновесия;  $a$  – аттракционная постоянная, характеризующая взаимодействие между адсорбированными частицами;  $c$  – концентрация ингибитора. Для этого рассмотрены графические зависимости  $\theta - \lg c$  (рис. 5а), прямолинейная зависимость которой соответствует изотермам Темкина и Фрумкина, и  $c/\theta - c$  (рис. 5б), соответствующая изотерме Ленгмюра.

Как видно, лучшее соответствие прямолинейной зависимости наблюдается для изотермы Ленгмюра. При этом отрезок, от-

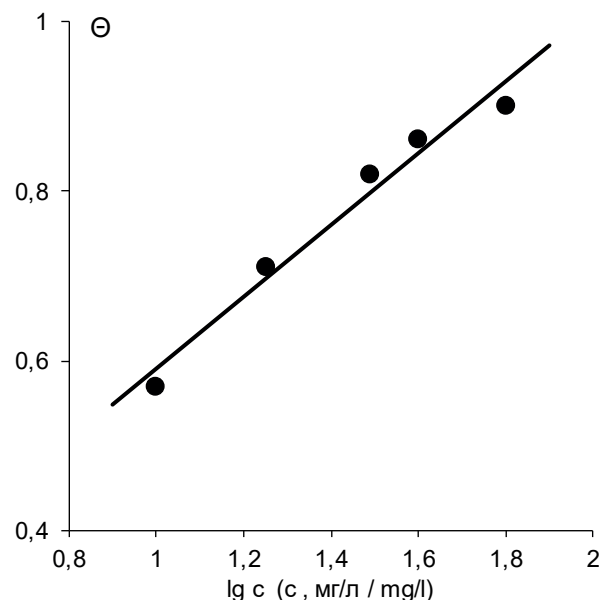
секаемый на вертикальной оси рис. 5а, позволяет рассчитать константу адсорбционного равновесия  $B$  ( $B = 0,125 \text{ л/мг}$ ). Величина константы  $B$  позволяет рассчитать величину изменения свободной энергии адсорбции  $-\Delta G_{ads}^0$  по уравнению (4):

$$-\Delta G_{ads}^0 = RT \ln(B \cdot 10^6), \quad (4)$$

где  $10^6$  – концентрация воды в мг/л.



а



б

Рис. 5. Адсорбционные изотермы на стали Ст3 в растворе NACE + 400 мг/л  $H_2S$

Fig. 5. Adsorption isotherms on St3 steel in NACE + 400 mg/L  $H_2S$  solution

Величина  $-\Delta G_{ads}^{\circ}$  при температуре 298 K в исследуемой среде равна 29 кДж/моль. Учитывая, что адсорбция частиц ингибитора происходит путем вытеснения адсорбированных молекул воды, поскольку железо является гидрофильным металлом, рассчитанная величина  $-\Delta G_{ads}^{\circ}$  оказывается заниженной из-за того, что часть энергии израсходована на вытеснение молекул воды. Поэтому можно полагать, что имеет место хемосорбция омепразола на поверхности стали.

### Заключение

Защитная эффективность омепразола исследована против коррозии углеродистой стали Ст3 в модели пластовой воды NACE, содержащей 400 мг/л  $H_2S$ , методами гравиметрии, потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии. Ингибиторные свойства омепразола в сероводородной среде можно оценить как средние.

Анализ поляризационных кривых свидетельствует о замедлении омепразолом обеих электродных реакций с некоторым преобладанием торможения анодного процесса.

Данные спектроскопии электрохимического импеданса позволили рассчитать степень заполнения поверхности стали ингибитором, оценить адсорбционную изотерму и рассчитать свободную энергию адсорбции.

*Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709 (уникальный идентификатор проекта RF – 2296.61321X0037)».*

### Литература

1. Pathak R.K., Mishra P. Drugs as Corrosion Inhibitors: A Review // Intern. J. Sci. Res. – 2016. – V. 5, № 4. – P. 671-677. www.ijsr.net
2. Verma C., Chauhan D.S., Quraishi M.A. Drugs as environmentally benign corrosion inhibitors for ferrous and nonferrous materials

in acid environment: An overview // J. Mater. Environ. Sci. – 2017. – V. 8, № 11. – P. 4040-4051. <http://www.jmaterenvironsci.com/>.

3. Bharatiya U., Gal P., Agrawal A., Shah M., Sircar A. Effect of Corrosion on Crude Oil and Natural Gas Pipeline with Emphasis on Prevention by Ecofriendly Corrosion Inhibitors: A Comprehensive Review // J. Bio-Tribo-Corros. – 2019. – V. 5, № 35. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0225-9>

4. Ngobiri N.C., Oguzie E.E., Oforka N.C., Akaranta O. Comparative study on the inhibitive effect of Sulfadoxine–Pyrimethamine and an industrial inhibitor on the corrosion of pipeline steel in petroleum pipeline water // Arab. J. Chem. – 2019. – V. 12. – P. 1024-1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.04.004>

5. Eid S. Expired Desloratidine Drug as Inhibitor for Corrosion of Carbon Steel Pipeline in Hydrochloric acid Solution // Int. J. Electrochem. Sci. – 2021. – V. 16. – P. 150852. doi: 10.20964/2021.01.27

6. Berisha A., An experimental and theoretical investigation of the efficacy of Panotoprazole as a corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium // Electrochem. – 2022. – V. 3, № 1. – P. 28-41. <https://doi.org/10.3390/electrochem3010002>

7. Hamdouni Y.E., Bouhlal F., Kouri H. and others. Use of Omeprazole as Inhibitor for C38 Steel Corrosion in 1.0 M  $H_3PO_4$  Medium // J Fail. Anal. and Preven. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00862-5>

8. Tsygankova L.E., Bryksina V.A., Uryadnikov A.A., Abramov A.E. Protective efficiency of expired drug against acid corrosion of carbon steel // Int. J. Corros. Scale Inhib. – 2022. – V. 11, № 2. – P. 564-576. doi: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-7

9. Киченко С.Б. и Киченко А.Б. Оценка комплексной эффективности ингибиторов коррозии // Практика противокоррозионной защиты. – 2005. – № 3. – С. 24-28.

10. Цыганкова Л.Е., Альшика Н., Костякова А.А. Исследование ингибирования сероводородной коррозии стали в синтетической пластовой воде комплексным методом // Практика противокоррозионной защиты. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 14-21. doi:10.31615/j.corros.prot.2019.93.3-2

11. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Батраков



В.В. Адсорбция органических соединений на электродах. – М.: Наука, 1968. – 334 с.

### References

1. Pathak, R. K., Mishra, P. (2016). Drugs as Corrosion Inhibitors: A Review. *Intern. J. Sci. Res.* 5, 671- 677. [www.ijsr.net](http://www.ijsr.net)
2. Verma, C., Chauhan, D. S. & Quraishi, M. A. (2017). Drugs as environmentally benign corrosion inhibitors for ferrous and nonferrous materials in acid environment: An overview. *J. Mater. Environ. Sci.*, 8(11), 4040-4051. <http://www.jmaterenvironsci.com/>
3. Bharatiya, U., Gal, P., Agrawal, A., Shah, M., Sircar, A. (2019). Effect of Corrosion on Crude Oil and Natural Gas Pipeline with Emphasis on Prevention by Ecofriendly Corrosion Inhibitors: A Comprehensive Review. *J. Bio- Tribo-Corros.*, 5(35), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0225-9>
4. Ngobiri, N. C., Oguzie, E. E., Oforka, N. C. & Akarantam O. (2019). Comparative study on the inhibitive effect of Sulfadoxine–Pyrimethamine and an industrial inhibitor on the corrosion of pipeline steel in petroleum pipeline water. *Arab. J. Chem.*, 12, 1024-1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.04.004>
5. Eid, S. (2021). Expired Desloratidine Drug as Inhibitor for Corrosion of Carbon Steel Pipeline in Hydrochloric acid Solution. *Int. J. Electrochem. Sci.* 16, 150852. doi:

10.20964/2021.01.27

6. Berisha, A. (2022). An experimental and theoretical investigation of the efficacy of Panotoprazole as a corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Electrochem.*, 3(1), 28-41. <https://doi.org/10.3390/electrochem3010002>
7. Hamdouni, Y. E., Bouhlal, F., Kouri, H. and others. (2020). Use of Omeprazole as Inhibitor for C38 Steel Corrosion in 1,0 M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Medium. *J Fail. Anal. and Preven.* <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00862-5>
8. Tsygankova, L. E., Bryksina, V. A., Uryadnikov, A. A. & Abramov, A. E. (2022). Protective efficiency of expired drug against acid corrosion of carbon steel. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 11(2), 564-576. doi: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-7
9. Kichenko, S. B. and Kichenko, A. B. (2005). Estimation of the complex efficiency of corrosion inhibitors, *Theory and Practice of Corrosion Protection*, (3), 24-28 (in Russian).
10. Tsygankova, L. E., Alshikha, N., Kostyakova, A. A. (2019). Study of the inhibition of hydrogen sulfide corrosion of steel in synthetic stratum water using the complex method. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 24(3), 14-21. doi:10.31615/j.corros.prot.2019.93.3-2
11. Damaskin, B. B., Petriy, O. A. & Batrakov, V. V. (1968). *Adsorption of organic compounds on electrodes*. Moscow, Nauka (in Russian).

### Информация об авторах

**Цыганкова Людмила Евгеньевна**, д.х.н., профессор, заведующая кафедрой химии, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Брыксина Виктория Александровна**, аспирант, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Алехина Ольга Владимировна**, к.х.н., доцент кафедры химии, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация

**Шель Наталья Владимировна**, д.х.н., профессор кафедры «Химия и химические технологии», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

### Information about authors

**Liudmila E. Tsygankova**, Doctor of Chemistry, Professor, Head of Department of Chemistry, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Viktoriya A. Bryksina**, postgraduate student, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Olga V. Alekhina**, PhD in Chemistry, associate professor, Derzhavin State University, Tambov, Russian Federation

**Natalia V. Shel**, Doctor of Chemistry, Professor of «Chemistry and Chemical Technology» Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation



**ОБОРУДОВАНИЕ НЕФТЕГАЗОДО-  
БЫЧИ И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ  
- КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА**

**EQUIPMENT FOR OIL AND GAS  
PRODUCTION AND OIL AND GAS  
PROCESSING – CORROSION AND  
PROTECTION**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-5

**Моделирование эрозионного износа регулирующего клапана Fisher V500  
линии подачи суспензии установки каталитического крекинга  
нефтяных остатков**

**М.Б. Рыспаева✉, Р.М. Нурисламов✉, А.Н. Нефедов, М.Ж. Журинов**

Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского,  
РК, 050010, г. Алматы, улица Кунаева, д. 142

e-mail: m.ryspayeva@ifce.kz, r.nurislamov@ifce.kz

**Аннотация.** Эрозия внутренних поверхностей трубопроводов и запорной арматуры, применяемых на нефтяных производствах, является весьма опасным явлением. Она возникает в результате воздействия на металл механических примесей, содержащихся в рабочей среде. Часто эрозия протекает совместно с коррозией. Вид разрушения под воздействием механических примесей определяется скоростью потока жидкости, а интенсивность и скорость эрозии зависит от концентрации и состава механических примесей. Решение задачи эффективного определения степени неблагоприятного воздействия среды в зависимости от различных параметров требует развития новых подходов, таких как моделирование. Моделирование гидродинамики для определения критических скоростей потока и расчет предполагаемых зон и скоростей эрозии обусловлено важностью решения проблемы противозерозионной защиты. Эффективным способом вычисления гидродинамики потока, прогнозирования участков, подверженных коррозионно-эрозионной опасности, и оценки скорости эродирования является метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). В работе выполнено CFD моделирование гидродинамики и эрозионного износа регулирующего клапана линии суспензии установки каталитического крекинга в программном комплексе ANSYS Fluent. Вычислены скорости потока, выделены области, подверженные влиянию критических скоростей, при которых возникает коррозионная эрозия. Показано влияние на скорость эрозии плотности и содержания механических примесей.

**Ключевые слова:** эрозионный износ, вычислительная гидродинамика, численное моделирование, эрозионная коррозия.

**Для цитирования:** Рыспаева М.Б., Нурисламов Р.М., Нефедов А.Н., Журинов М.Ж. Моделирование эрозионного износа регулирующего клапана Fisher V500 линии подачи суспензии установки каталитического крекинга нефтяных остатков // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 45-51. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-5

Статья получена: 22.07.2022, опубликована 01.12.2022.

**Computational modeling of erosion wear of the Fisher V500  
control valve of the slurry supply line of the catalytic cracking  
facility of oil residues**

**M.B. Ryspayeva✉, R.M. Nurislamov✉, A.N. Nefedov, M.Zh. Zhurynov**

D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry,  
142, Kunaev st., Almaty 050010, Republic of Kazakhstan

e-mail: m.ryspayeva@ifce.kz, r.nurislamov@ifce.kz

**Abstract.** Erosion of the internal surfaces of pipelines and shut-off valves used in oil production is a very dangerous phenomenon. It occurs as a result of the impact on the metal of mechanical impurities contained in the working environment. Erosion often occurs together with corrosion. The type of destruction under the influence of mechanical impurities is determined by the fluid flow rate, and the intensity and rate of erosion depends on the concentration and composition of mechanical impurities. Solving the problem of effectively determining the degree of adverse environmental impact depending on various parameters requires the development of new approaches, such as modeling. Modeling of hydrodynamics to determine critical flow rates and calculation of expected zones and erosion rates is due to the importance of solving the problem of anti-erosion protection. In this paper, CFD modeling of hydrodynamics and erosive wear of the control valve of the suspension line of the catalytic cracking unit is performed in the ANSYS Fluent software package. The flow velocities are calculated, and the areas affected by critical velocities

at which corrosion erosion occurs are also shown. The effect of density and content of mechanical impurities on the erosion rate is shown.

**Keywords:** erosive wear, computational fluid dynamics, computational modeling, erosive corrosion.

**For citation:** Ryspayeva, M. B., Nurislamov, R. M., Nefedov, A. N. & Zhurynov, M. Zh. (2022). Computational modeling of erosion wear of the Fisher V500 control valve of the slurry supply line of the catalytic cracking facility of oil residues. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(4), 45-51. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-5

Received: July 22, 2022. Published: December 01, 2022.

## Введение

Содержание механических примесей в рабочем объеме трубопроводов и запорной арматуры нефтеперерабатывающих производств является крайне нежелательным, но зачастую неизбежным явлением. Примерами механических примесей являются пыль, песок, частицы адсорбента, катализатора, железа и минеральных солей [1]. Механические примеси, содержащиеся в перекачиваемых по трубопроводам жидкостях, вызывают эрозию, коррозию внутренних поверхностей труб и запорной арматуры.

Эрозия внутренних поверхностей трубопроводов, применяемых в нефтяных производствах, является весьма опасным явлением. Высокая скорость захваченных механических примесей приводит к повреждению трубопроводов и истончению стенки, вызывая в дальнейшем экономические потери и экологические проблемы. Существует большая потребность в методах, которые способны спрогнозировать эрозионно-опасные участки, а также точно и быстро определить скорость разрушения. Современное состояние развития методов численного моделирования и прикладных программных пакетов позволяют проводить оценку износа материала. Наиболее эффективным и широко применяемым в научной среде является подход на базе методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). Такой подход позволяет учитывать геометрию и рабочие условия рассматриваемой детали, применяя полуэмпирические, аналитические и комбинированные зависимости для оценки скорости эродирования.

## Объект исследования

Объектом исследования данной работы является регулирующий клапан линии подачи суспензии установки каталитического крекинга нефтяных остатков. Регулирующий механизм клапана имеет грибообраз-

ную форму, с расположением запорного элемента на поворотной оси с небольшим эксцентриситетом. Регулирующий механизм перекрывает выход из клапана и сопрягается с уплотнителем (рис. 1).

## Методы исследования

Вид разрушения под воздействием механических примесей определяется скоростью потока жидкости, а интенсивность и скорость эрозии зависит от концентрации и состава механических примесей, а также твердости материала. Поэтому в данной работе были определены распределение скоростей в объеме клапана и критические скорости потока.

При больших скоростях потока жидкости доминирует коррозионно-эрозионный износ. При малых скоростях потока происходит вынос механических примесей и их последующее осаждение на стенках труб.

Ниже представлена эмпирическая зависимость [2] для оценки критической скорости потока, превышение которой вызывает коррозионную эрозию:

$$v_{kp} = 1,22C / \sqrt{\rho} ,$$

где  $v_{kp}$  – критическая скорость потока, м/с;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>·ч;

$C$  – эмпирическая константа, зависящая от типа среды.

При этом  $C=100$  для неабразивных водных сред;  $C=30...45$  для коррозионно-агрессивных сред, содержащих абразивные частицы;  $C=45...90$  для коррозионно-агрессивных сред без абразивных частиц;  $C=90...150$  для неагрессивных сред без абразивных частиц.

Для моделирования течения среды в данной работе использована модель турбулентности Shear Stress Transport (SST). Модель представляет собой комбинацию стандартной  $k-\varepsilon$  модели [3], зарекомендовавшей себя для расчета струйных и свободных сдвиговых течений, и  $k-\omega$  модели [4], позво-

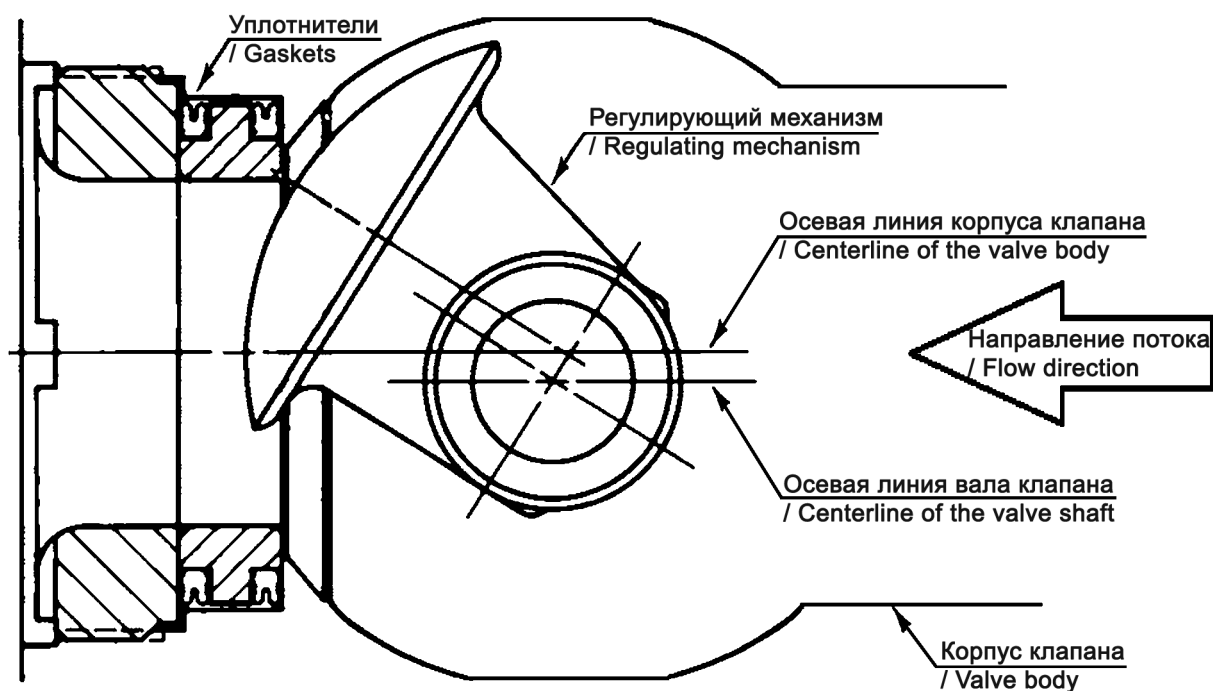


Рис. 1. Схема клапана

Fig. 1. Scheme of valve

ляющей предсказать средние характеристики течения в пограничных слоях с высокой точностью.

Модель SST была выбрана ввиду того, что она работает как  $k-\varepsilon$  модель вдали от стенок и как  $k-\omega$  – вблизи них, за счет чего более точно описывает течение среды.

При моделировании эрозионного износа была использована модель Ока [5].

Поскольку массовый расход частиц мал, и они не оказывают значительного влияния на поток жидкости, было выбрано одностороннее взаимодействие частиц с жидкостью. Для взаимодействия частиц со стенкой была выбрана модель reflect (концепция отражения частиц), поскольку механические примеси являются твердыми и при столкновении со стенкой частицы отскакивают от нее и возвращаются обратно в движущийся поток. Зона удара подвергается деформированию, сталкивающиеся со стенкой частицы уносят при соударении материал стенок.

#### Численное моделирование и результаты расчетов

Процесс моделирования состоит из нескольких этапов:

- подготовка геометрии;
- создание расчетной и сеточной модели;
- выбор уравнений и граничных условий;
- проведение расчета и анализ полученных результатов.

Первым этапом для осуществления численного моделирования является создание геометрической модели исследуемого объекта. Геометрическая модель регулирующего клапана была построена в программе Solidworks, а затем импортирована в ANSYS Fluent.

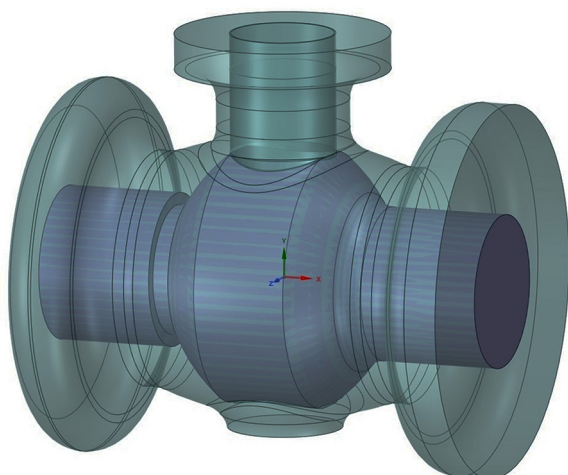
Расчетная модель получается из трехмерной путем «заполнения» внутреннего пространства регулирующего клапана средой (рис. 2).

Сеточная модель (рис. 3) разбивает геометрию расчетной модели на элементы маленького объема. В каждом из узлов сетки будет решаться система дифференциальных уравнений.

Граничными условиями являются скорость потока и давление на входе. Так же задаются характеристики среды.

При построении модели за основу были взяты параметры реальной технологической линии:





**Рис. 2. Трехмерная модель клапана с выделенной областью заполнения жидкостью**

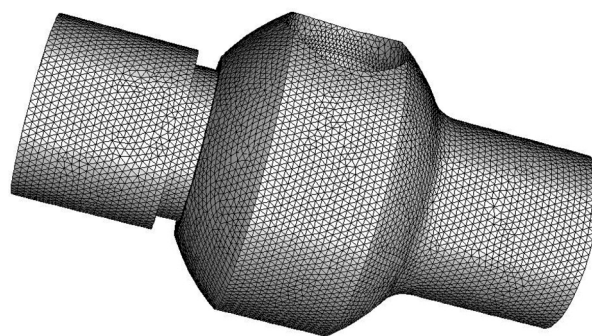
**Fig. 2. Three-dimensional model of valve with an allocated liquid filling area**

- температура среды: 325 °C;
- давление среды на входе в клапан: 1 МПа;
- плотность среды: 843,3 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость среды: 0,52 мПа/с;
- скорость входного потока среды: 0,6 м/с, 1,22 м/с, 1,47 м/с;
- плотность частиц механической примеси: 2400 кг/м<sup>3</sup>;
- диаметр частиц механической примеси: 100 мкм;
- твердость частиц механической примеси по Виккерсу (HV): 600;
- сферичность частиц механической примеси: 1,0;
- материал клапана: ASTM A217 Gr C5;
- плотность материала клапана: 7800 кг/м<sup>3</sup>;
- твердость материала клапана по Виккерсу (HV): 272.

Результатом моделирования гидродинамики потока являются контуры скоростей, построенные при различных значениях входной скорости потока среды (рис. 4).

Согласно вышеприведенной зависимости, критическая скорость потока, превышение которой вызывает коррозионную эрозию, равна 1,26...1,89 м/с.

Из построенных контуров скоростей потока видно, что критические скорости потока приходятся на зоны уплотнения клапана, в которых происходит сужение потока. При



**Рис. 3. Сеточная модель**

**Fig. 3. Meshing model of valve**

этом, при покидании критической зоны, поток обладает значительной турбулентностью и нормализуется крайне медленно.

Моделирование эрозии проводилось при различном содержании механической примеси в суспензии (0,1 масс. %, 1,2 масс. %, 5% масс. %), а также при различных плотностях частиц механической примеси (1800 кг/м<sup>3</sup>, 2200 кг/м<sup>3</sup>, 2400 кг/м<sup>3</sup>, 3000 кг/м<sup>3</sup>, 4000 кг/м<sup>3</sup>). Результат моделирования представлен на рис. 5-7.

Из результатов моделирования видно, что эрозионные зоны локализованы на областях металла клапана, где имеются высокие скорости потока (рис. 5). В основном локализация этих зон приходится на уплотнения клапана.

Влияние на скорость эрозии металла клапана содержания механических примесей в потоке и их плотности представлено на рис. 6 и 7 соответственно.

Из представленной на рис. 6 зависимости следует, что с увеличением содержания механической примеси в потоке среды при скорости ее движения 1,22 м/с скорость эрозии стенки клапана возрастает линейно. Допустимому значению скорости эрозии 0,1 мм/год соответствует концентрация механической примеси 0,25% масс.

Представленная на рис. 7 зависимость показывает, что с увеличением плотности механической примеси с концентрацией 1,2% масс. в потоке среды при скорости ее движения 1,22 м/с скорость эрозии стенки клапана возрастает линейно при плотностях частиц до 3000 кг/м<sup>3</sup>. При рассмотрении зависимости для плотностей механической

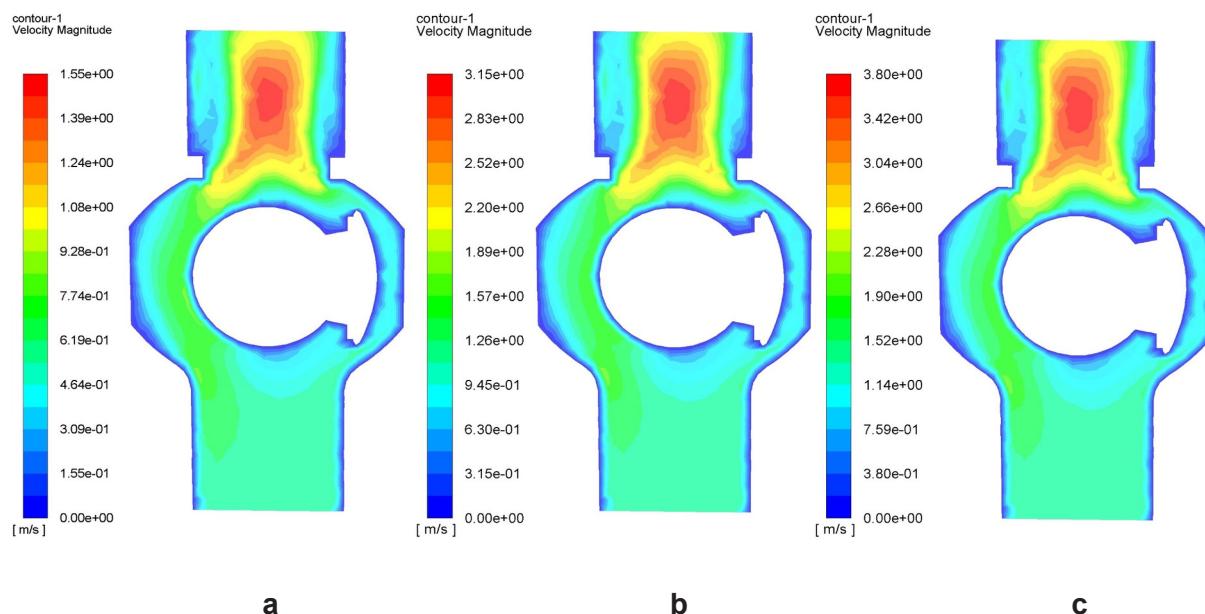


Рис. 4. Контуры скоростей движения потока при скорости входного потока:  
a – 0,6 м/с; b – 1,22 м/с; c – 1,47 м/с

Fig. 4. Contours of velocity with input velocity:  
a – 0,6 m/s; b – 1,22 m/s; c – 1,47 m/s

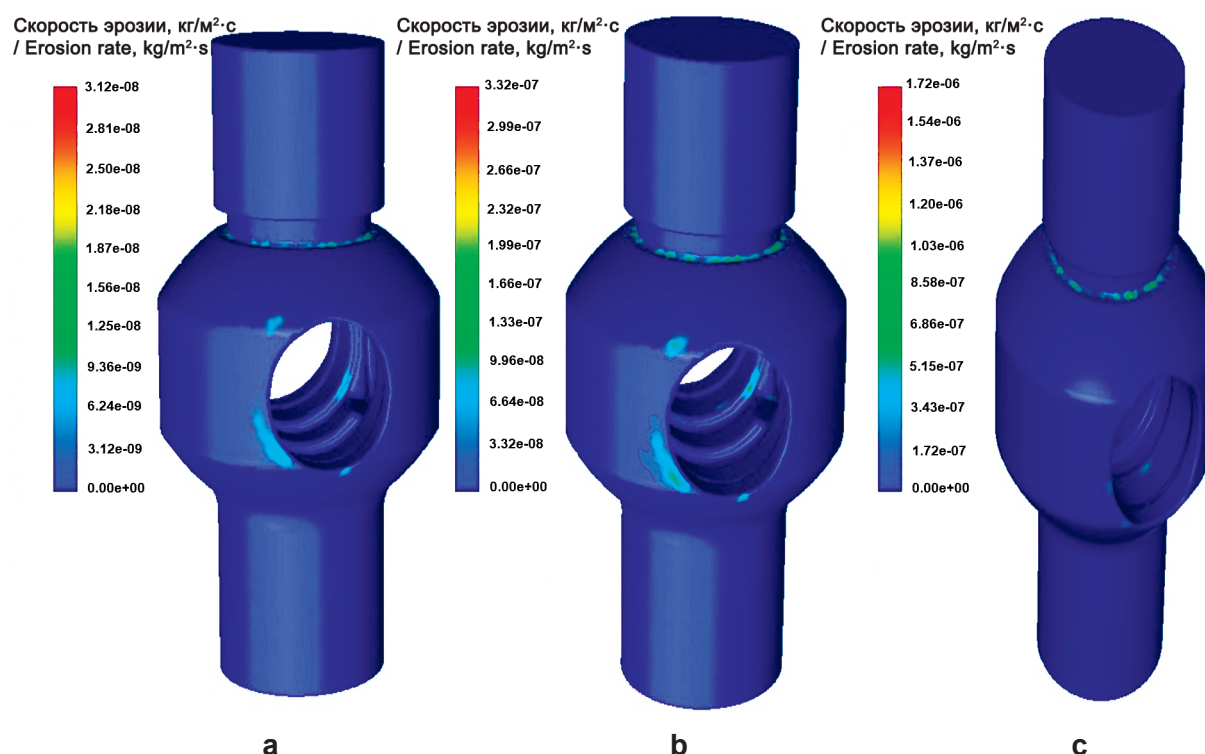
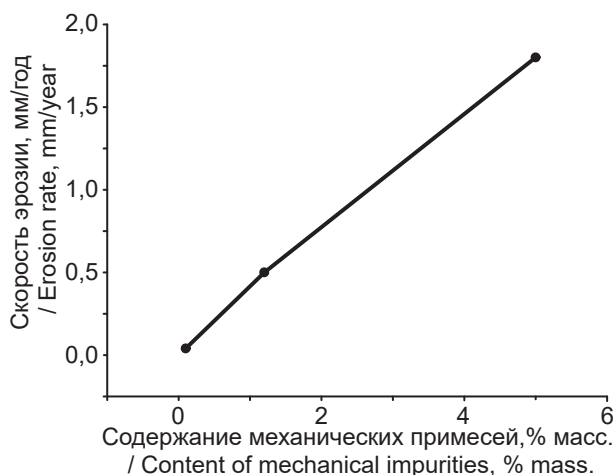


Рис. 5. Эрозионные зоны на внутренней стенке клапана (темный цвет – среда, светлые участки – зоны эрозионных потерь) при содержании механических примесей:  
a – 0,1% масс.; b – 1,2% масс.; c – 5,0% масс.

Fig. 5. Erosion zones on the inner walls of the valve (dark color – liquid filling area, light color – zones of erosion losses) with the content of mechanical impurities:  
a – 0,1% mass.; b – 1,2% mass.; c – 5,0% mass.



**Рис. 6. Зависимость скорости эрозии металла клапана от содержания механических примесей (скорость потока – 1,22 м/с)**

**Fig. 6. Dependence of the erosion rate on the content of mechanical impurities (the flow rate is 1,22 m/s)**

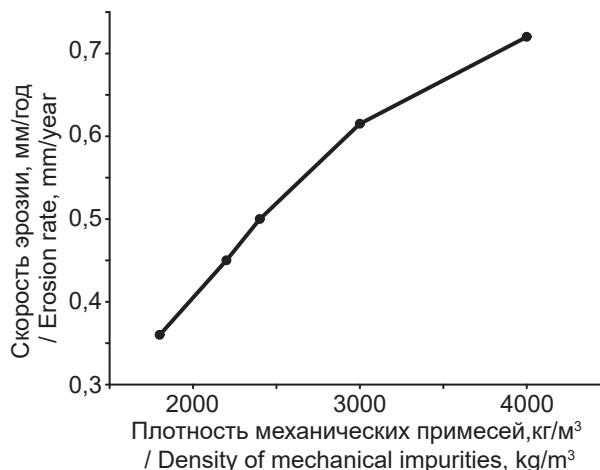
примеси от 3000 кг/м<sup>3</sup> до 4000 кг/м<sup>3</sup> скорость износа металла изменилась от 0,6 мм/год до 0,72 мм/год, что превышает допустимое значение скорости эрозии 0,1 мм/год. Допустимому значению скорости эрозии 0,1 мм/год соответствует плотность механической примеси 1500 кг/м<sup>3</sup>.

### Выводы

1. Численная модель позволила получить распределение зон эрозии, исходя из фактической геометрии клапана.
2. Результаты моделирования позволили произвести оценку потери металла в процессе эрозионного износа, исходя из абразивных характеристик и распределения твердых частиц в потоке.
3. По результатам CFD моделирования были определены зоны повышенной турбулентности среды в рабочем объеме клапана как зоны с эрозионным износом.
4. Результаты моделирования позволили оценить влияние плотности частиц на процесс эрозии.

### Литература

1. Рыбак Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. – М.: ГосТехИздат, 1962. – 888 с.
2. Красноярский В.В., Френкель Г.Я., Носов Р.П. Коррозия и защита металлов. – М.:



**Рис. 7. Зависимость скорости эрозии металла клапана от плотности механических примесей (скорость потока 1,22 м/с, содержание механических примесей 1,2% масс.)**

**Fig. 7. Dependence of the erosion rate on the density of mechanical impurities (the flow rate is 1.22 m/s, the content of mechanical impurities is 1,2% mass.).**

Металлургия, 1969. – 301 с.

3. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1974. – V. 3, № 2. – P. 269-289.

4. Wilcox D.C. Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models // AIAA J. – 1988. – V. 26, № 11. – P. 1299-1310.

5. Oka Y.I., Ohnogi H., Hosokawa T., Matsumura M. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact // Wear. – 1997. – V. 203. – P. 573-579.

### References

1. Rybak, B. M. (1962). *Analysis of oil and petroleum products*. Moscow: Gostekhizdat.
2. Krasnoyarskiy, V. V., Frenkel, G. Ya. & Nosov, R. P. (1969). *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgy.
3. Launder, B. E., Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3(2), 269-289.
4. Wilcox, D. C. (1988). Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models. *AIAA J.*, 26(11), 1299-1310.





5. Oka, Y. I., Ohnogi, H., Hosokawa, T. & Matsumura, M. (1997). The impact angle

dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 203, 573-579.

#### Информация об авторах

**Рыспаева Марал Батырбеккызы**, старший инженер отдела моделирования Центра компетенции по проблемам коррозии, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», г. Алматы, Республика Казахстан  
**Нурисламов Руслан Мисхатович**, заведующий отделом моделирования Центра компетенции по проблемам коррозии, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», г. Алматы, Республика Казахстан  
**Нефедов Александр Николаевич**, к.х.н., руководитель Центра компетенции по проблемам коррозии, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», г. Алматы, Республика Казахстан  
**Журинов Мурат Журинович**, д.х.н., профессор, академик, президент Национальной Академии Наук Республики Казахстан, генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», г. Алматы, Республика Казахстан

#### Information about authors

**Maral B. Ryspayeva**, lead engineer of modeling department of the Corrosion Competence Center, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

**Ruslan M. Nurislamov**, head of modeling department of the Corrosion Competence Center, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

**Alexandr N. Nefedov**, Ph.D in Chemistry, Head of the Corrosion Competence Center, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

**Murat Zh. Zhurynov**, Doctor of Chemistry, Professor, Academician, President of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, General Director of D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова

#### Ингибирование сероводородной и углекислотной коррозии металлов. Универсализм ингибиторов

Объем издания: 15,25 п.л. (253 стр.)  
Стоимость 550 руб.

В монографии обобщены литературные данные и результаты многолетних исследований, выполненных под руководством авторов по вопросам ингибирования коррозии углеродистой стали в сероводородных и углекислотных средах. Значительное внимание уделено разработке критериев защитной эффективности ингибиторов, особенностям кинетики и механизма разрушения стали в присутствии  $H_2S$  и  $CO_2$  в слабокислых и близких к ней-

тральным минерализованным средам. Анализируется действие большого количества промышленных ингибиторов и лабораторных образцов, в том числе на основе имидазолинов, алифатических, циклических и оксиэтилированных аминов. Рассматривается их защитная эффективность, влияние на кинетику электродных реакций, бактерицидные свойства, и интегральная токсикологическая характеристика, торможение твердофазной диффузии водорода и воздействие на сохраняемость механических свойств стали в сероводородных и углекислотных средах и при совместном присутствии  $H_2S$  и  $CO_2$ .





**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА  
ОТ КОРРОЗИИ – ОБЩИЕ ВОПРОСЫ**

**CORROSION AND PROTECTION  
AGAINST CORROSION –  
GENERAL ISSUE**

doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-6

**Об определяющей роли биопленок микроорганизмов в иницировании  
и развитии микробиологической коррозии металлов (часть 1)**

**Д.В. Белов<sup>✉</sup>, С.Н. Беляев**

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,  
РФ, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

*e-mail: belov.denbel2013@yandex.ru*

**Аннотация.** Надежность технических изделий определяется их стойкостью к воздействию внешней среды, естественной составляющей которой являются микроорганизмы-деструкторы (бактерии, дрожжи, микроскопические грибы и др.).

Низкая эффективность защиты металлов от биокоррозии во многом связана с недостаточной изученностью всех аспектов повреждающего воздействия микроорганизмов. Отсутствуют количественные данные о процессах биоповреждения элементов техники в реальных условиях эксплуатации. К настоящему времени не разработаны достоверные методы диагностики и прогнозирования долговечности металлов и их конструкций в условиях взаимодействия с объектами живой природы.

В данной работе сделана попытка объяснить роль биопленок микроскопических грибов, как важного фактора микробиологической коррозии металлов. Образование и накопление коррозионно-активной среды возможно в результате процессов метаболизма микроскопических грибов, формирующих биопленку. Детальное установление механизма биокоррозии металлов представляет собой комплексную научную задачу.

Целью статьи является анализ экспериментальных данных по изучению аэробной биокоррозии металлов, опосредованной метаболической активностью биопленок бактерий и микроскопических грибов.

**Ключевые слова:** микробиологическая коррозия, микромицетная коррозия, микробиологическая коррозия, биокоррозия металлов, бактериальная биопленка, биопленка микроскопических грибов, микромицетная биопленка, адгезия микроорганизмов, метаболомика.

**Для цитирования:** Белов Д.В., Беляев С.Н. Об определяющей роли биопленок микроорганизмов в иницировании и развитии микробиологической коррозии металлов (часть 1) // Практика противокоррозионной защиты. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 52-67. doi: 10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-6

*Статья получена: 12.04.2022, опубликована 01.12.2022.*

**On the decisive role of biofilms of microorganisms in the initiation and  
development of microbiological corrosion of metals (part 1)**

**D.V. Belov<sup>✉</sup>, S.N. Belyaev**

Federal Research Center Institute of Applied Physics of RAS,  
46, Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

*e-mail: belov.denbel2013@yandex.ru*

**Abstract.** The reliability of technical products is determined by their resistance to the influence of the external environment, the natural component of which are destructor microorganisms (bacteria, yeast, microscopic fungi, etc.).

The low efficiency of protecting metals from biocorrosion is largely due to insufficient knowledge of all aspects of the damaging effects of microorganisms. There are no quantitative data on the processes of biodamage of equipment elements in real operating conditions. To date, reliable methods for diagnosing and predicting the durability of metals and their structures under conditions of interaction with wildlife have not been developed.

In this work, an attempt was made to explain the role of biofilms of microscopic fungi as the important factor in the mycological corrosion of metals. The formation and accumulation of a corrosive medium is possible as a result of the metabolic processes of microscopic fungi that form a biofilm. A detailed determination of the mechanism of biocorrosion of metals is a complex scientific problem.

The purpose of this article is to analyze experimental data on the study of aerobic biocorrosion of metals mediated by the metabolic activity of biofilms of bacteria and microscopic fungi.

**Keywords:** microbiological corrosion, micromycete corrosion, mycological corrosion, metal biocorrosion, bacterial biofilm, microfungus biofilm, micromycete biofilm, adhesion of microorganisms, metabolomics.

**For citation:** Belov D.V., Belyaev S.N. (2022). On the decisive role of biofilms of microorganisms in the initiation and development of microbiological corrosion of metals (part 1). *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 27(4), 52-67. doi:10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-6

Received: April 12, 2022. Published: December 01, 2022.

## Введение

Биологическим повреждением является любое нарушение структурных и функциональных характеристик объекта техники, вызываемое биологическим фактором, под которым принято понимать организмы или их сообщества, который нарушает его работоспособное состояние. Наиболее агрессивными по отношению к материалам и изделиям являются следующие микроорганизмы (микроорганизмы-деструкторы, биодеструкторы): бактерии, дрожжи, микроскопические грибы. Биодеструкторы в силу специфики своей жизнедеятельности способны быстро адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям окружающей среды. Практически все материалы, используемые в изделиях техники (полимеры, древесина, стекло, композиты, металлы и др.), подвержены микробиологическому повреждению. Интенсивность микробиологического повреждения характеризует микробиологическую стойкость материала, детали, изделия в процессе или после воздействия биологического фактора.

В 2016 году в научно-популярном издании "Popular mechanics" появилась статья Э. Теглера под заголовком "Как ВВС будут атаковать своего крошечного врага: бактерии, разъедающие самолеты. Микробы любят металл" ("How the Air Force Will Attack Its Tiniest Enemy: Plane-Corroding Bacteria") [1]. Как отмечает автор, если раньше ВВС США связывали основной ущерб от коррозии конструкционных материалов с воздействием факторов окружающей среды, то в настоящее время особую роль отводят биологическим факторам, в частности, микроорганизмам. На изучение проблем коррозии ВВС тратят около 6 миллиардов долларов в год, из них до 1,2 миллиардов приходится на изучение коррозии под воздействием микробиологических факторов.

Микроорганизмы могут участвовать как в анодном процессе коррозии, принимая непосредственное участие в разрушении поверхности металла и становясь акцепторами электронов, так и в катодном про-

цессе, где в качестве деполяризатора могут выступать молекулы кислорода, воды, а также сами микроорганизмы и их продукты метаболизма. В некоторых случаях процессы разрушения материалов оборудования и сооружений называют термином "биоповреждение", а образование микроорганизмами больших колоний, приводящих к нарушению режима их эксплуатации – "биообрастание".

Термин "микробиологическая коррозия" (microbiologically influenced corrosion, MIC) используется для обозначения коррозии, вызванной присутствием и активностью микроорганизмов [2-6].

В настоящее время формируется концепция об определяющем влиянии на биокоррозию металлов микроскопических грибов в виде конгломерата или биопленки, формирующейся на их поверхности. Детальные механизмы биокоррозии металлов изучены неполно. Важнейшей задачей является установление факторов адгезии и колонизации микромицетов по отношению к поверхностям металлов. Недавние исследования в этой области были сосредоточены на влиянии процессов биоминерализации, происходящих на металлических поверхностях. В том числе на влиянии внеклеточных ферментов, проявляющих активность в матрице биопленки на электрохимические реакции на границе раздела биопленка – металл [7, 8].

Впервые открытая в 1978 году, специфическая форма существования бактерий в виде биопленок [9] признана преобладающей формой микробной жизни на нашей планете. Биопленки определяют как особую форму организации микроорганизмов, образующихся на разделе двух фаз, интенсивно обменивающихся генетической информацией и способных координировать свое поведение за счет секреции молекулярных сигналов – Quorum Sensing [10]. Изучение биопленок полезно во многих практических приложениях: медицинской микологии, микробной экологии природных и промышленных вод. Открытие биопленок приводит к необходимости лучшего понимания меха-

низмов вирулентности и персистенции патогенных микроорганизмов. Практическая значимость изучения планктонной и биопленочной форм обитания микроорганизмов в водных средах обусловлена актуальностью повышения эффективности биоцидной защиты конструкций и сооружений.

Последние два десятилетия активно изучались бактериальные и дрожжевые биопленки [11]. Существуют четко определенные модели, критерии и фенотипы, характеризующие бактериальные и дрожжевые биопленки. Только в последние несколько лет мицелиальные грибы также стали рассматриваться как биопленкообразующие микроорганизмы. В настоящее время широко обсуждается вопрос образования биопленок мицелиальными грибами, ассоциированными с поверхностью [12].

Микроорганизмы способны прикрепляться практически к любым поверхностям. В настоящее время показано, что поверхностно-ассоциированные микроорганизмы, формирующие биопленки, обычно имеют фенотип, отличный от фенотипа планктонных клеток [13]. В исследовании [14] охарактеризована разница в реакции на стресс между сидячими (прикрепленными) и планктонными бактериальными популяциями. Бактериальные биопленки лучше противостоят воздействию ионов тяжелых металлов, чем планктонные формы культур бактерий того же вида. Это явление приписывают многим особенностям сидячего образа жизни, который отсутствует у свободно плавающих популяций. В частности, на воздействие ионов меди планктонная популяция реагировала окислительным стрессом, тогда как те же виды в среде биопленки реагировали сдвигами в метаболизме, связанном с синтезом и высвобождением внеклеточных метаболитов, например, полисахаридов.

Биопленочные микроорганизмы имеют специфические механизмы прикрепления к поверхности, развития структуры сообщества и экосистемы. Прикрепление – это сложный процесс, регулируемый разнообразными характеристиками питательной среды, субстрата и клеточной поверхности [15].

Биопленки – это физические структуры, образуемые микробными сообществами на поверхности раздела фаз: жидкость (водная

среда) – твердая поверхность, жидкость – воздух, две несмешивающиеся жидкости и твердая поверхность – воздух. Наиболее подробно исследованы биопленки, развивающиеся на границе жидкой и твердой сред. Биопленки могут формироваться бактериями одного вида, или формируют сообщества, развивающиеся из многих видов бактерий, а также могут включать и другие микроорганизмы. Зрелые, уже сформированные биопленки могут содержать также покоящиеся или некультивируемые формы бактерий [16-19].

### 1. Бактериальные биопленки

Одна из основных стратегий выживания бактерий заключается в формировании биопленок. Бактериальные биопленки, образующиеся в природных и промышленных системах, защищены от антибактериальных химических веществ, бактериофагов, фагоцитов и других воздействий окружающей среды. В отличие от планктонной формы микроорганизмов, биопленка представляет собой сидячее микробное сообщество, образуемое клетками, которые необратимо прикреплены к субстрату, поверхности раздела или друг к другу, и погружены в матрикс продуцируемых ими внеклеточных полимерных веществ. Биопленки могут образовываться на самых разных поверхностях, включая живые ткани, внутренние медицинские устройства, трубопроводы промышленных или питьевых систем водоснабжения, природные водные системы. Биопленки предпочтительно образуются в среде с высоким усилием сдвига. Поверхность раздела между твердой и жидкой фазой между поверхностью и водной средой обеспечивает идеальную среду для прикрепления и роста микроорганизмов. Близость клеток внутри микроколонии или между ними обеспечивает идеальную среду для создания градиентов питательных веществ, обмена генами и определения кворума. Биопленки могут адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и составу сообщества [20].

В настоящее время биопленки рассматриваются как сложные дифференцированные сообщества микроорганизмов [21]. Бактериальная биопленка представляет

собой совокупность ассоциированных с поверхностью микробных клеток, заключенных в матрикс из внеклеточного полимерного вещества, преимущественно состоящего из полисахаридного материала. В матрице биопленки, в зависимости от среды, в которой она формировалась, могут присутствовать неклеточные материалы, например, остатки минеральных веществ, продукты коррозии, иные биологические компоненты и др.

В определенном смысле термин «биопленка» является не совсем правильным, поскольку она гетерогенна и не является непрерывным монослойным поверхностным отложением.

Микроколонии отделены друг от друга интерстициальными пустотами (водными каналами) [22]. Архитектура биопленок неоднородна как в пространстве, так и во времени, постоянно меняется под действием внешних и внутренних процессов [23-28]. Состав и строение полисахаридов определяют конформацию, жесткость и деформируемость матрикса биопленки [29, 30]. К настоящему времени обобщены аналитические методы исследования внеклеточных полимерных веществ и подробно изучены полисахариды и белки биопленок микроскопическими, спектроскопическими и микросенсорными методами [31].

Поверхность раздела между твердой (субстрат) и жидкой фазами (вода, кровь) обеспечивает идеальную среду для прикрепления и роста микроорганизмов. Твердая поверхность должна иметь несколько характеристик, важных для процесса прикрепления. Степень микробной колонизации увеличивается по мере увеличения шероховатости поверхности [32]. Это связано с тем, что площадь всей совокупности микронеровностей, образующих рельеф шероховатой поверхности, больше такого же участка полированной поверхности. На скорость и степень прикрепления сильное влияние оказывают физико-химические свойства поверхности. В ряде работ указывается, что микроорганизмы быстрее прикрепляются к гидрофобным неполярным поверхностям (тефлон, пластмассы и пр.), чем к гидрофильным материалам (стекло, металлы и пр.) [33-35].

Вероятно, между поверхностью клетки и поверхностью субстрата происходит своего рода гидрофобное взаимодействие, позволяющее ей необратимо прикрепляться. Гидрофобность клеточной поверхности влияет на скорость и степень прикрепления микробных клеток. Гидрофобные взаимодействия имеют тенденцию увеличиваться с уменьшением полярности поверхности микробной клетки и поверхности субстрата. Большинство бактерий содержат определенные гидрофобные поверхностные компоненты, выполняющие функции объединения отдельных клеток в агрегаты и прикрепления их к разнообразным субстратам. У бактериальной клетки эту функцию выполняют фимбрии – поверхностные нитевидные белковые структуры, покрывающие всю поверхность клетки. Они состоят из белка пилина, субъединица которого уложена в форме одинарной полый спирали, берущей начало в цитоплазматической мембране. Эти нежгутиковые придатки отличаются от тех, которые участвуют в переносе вирусных или бактериальных нуклеиновых кислот (называемых пили) [36-38].

Есть сведения об определяющей роли миколовых кислот в прикреплении бактерий к гидрофобным субстратам [39].

Определяющую роль в процессе коррозии играет адгезия микроорганизмов к металлическим поверхностям [40]. В литературе широко обсуждается вопрос об участии в регуляции адгезии бактерий молекул полисахаридов [41]. В работах [42, 43] приведены доказательства того, что вещество, участвующее в первичной адгезии бактерий *Pseudomonas fluorescens* и *Desulfovibrio desulfuricans* к поверхности стали, имеет полисахаридную природу. Авторы анализировали внеклеточные полимерные вещества бактериальных культур, выращенных на поверхностях образцов из мягкой и нержавеющей стали и без них, на содержание углеводов. Установлено влияние поверхностей на количество и вид сахаров, выделяющихся в объемную фазу. В работе [44] представлены данные о роли сложного полисахарида в адгезии бактерии *Pseudomonas fragi* к поверхности нержавеющей стали. Показано, что О-антигенный компонент липополисахарида придает гидрофильные свойства гра-



мотрицательным бактериям. Показано, что мутанты бактерии, лишенные О-антигена, способны адгезировать к гидрофобным материалам [45-47].

Нержавеющая сталь является важным материалом, используемым во многих областях благодаря своей механической прочности и устойчивости к коррозии. В состав нержавеющей стали входят различные легирующие элементы, которые могут оказывать существенное влияние не только на коррозию материала, но и на свойства поверхности, в частности, на способность адгезии клеток бактерий к поверхности. В исследовании [48] изучалось влияние адгезии сульфатредуцирующих бактерий на коррозионное поведение в морской воде различных нержавеющей сталей. Как показали исследования, скорость микробиологической коррозии различных материалов зависит не только от способности бактерий к адгезии, но и от стабильности пассивной пленки, которая определяется наличием легирующих элементов, таких как молибден и хром.

**Стадии формирования биопленок.** Выделяют несколько последовательных стадий образования биопленок (рис. 1).

Начало развития биопленок – это переход бактерий от планктонного способа существования к способу, связанному с прикреплением подвижных клеток к биотической или абиотической поверхности. У бактерий известно несколько типов миграции клеток по поверхности сред. Первичный контакт планктонной клетки бактерии и поверхности среды может происходить случайно, например, при пассивной миграции клеток с током жидкости, либо вследствие направленного движения, обусловленного хемотаксисом. Стадия первичной адгезии длится несколько секунд, является обратимой и зависит от неспецифических межмолекулярных взаимодействий (Ван-дер-ваальсовы, электростатические силы и др.) между поверхностными структурными элементами клетки микроорганизма и субстрата. Вторая стадия адгезии характеризуется необратимым связыванием бактериальных клеток с поверхностью при помощи специфических молекул – адгезинов. Важную роль при этом играют различные клеточные структуры, такие как, фимбрии (пили), жгутики, а также поверхностные белки, липополисахариды. На этой стадии формируются микроколо-

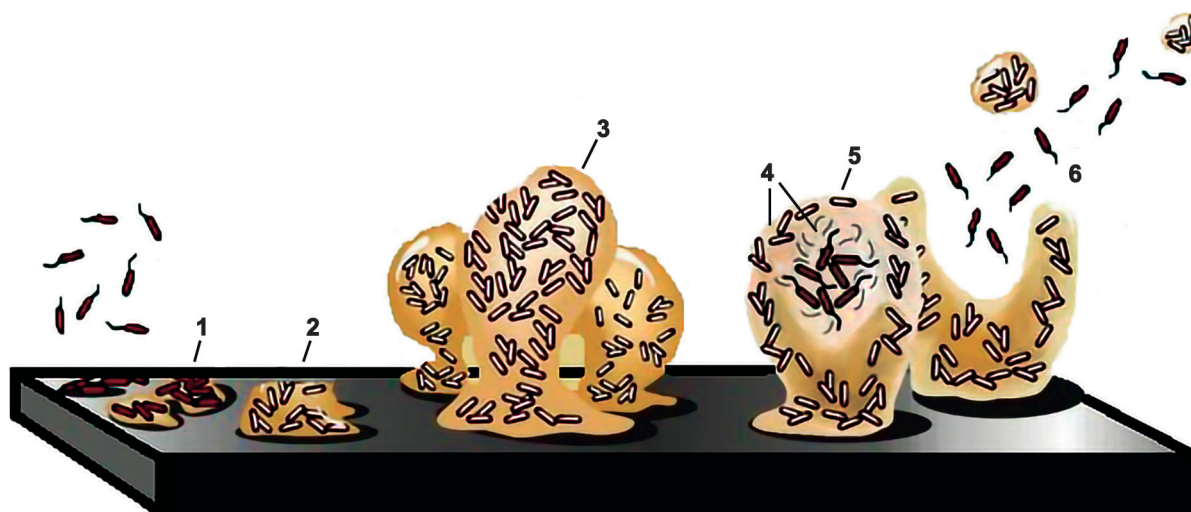


Рис. 1. Схематическое представление образования биопленки: 1 – прикрепление клеток к поверхности; 2 – миграция клеток по поверхности; 3 – формирование микроколоний; 4 – формирование внеклеточного полимерного матрикса и многоклеточного слоя; 5 – образование макроколоний; 6 – дисперсия биопленки

Fig. 1. Schematic representation of biofilm formation: 1 – attachment of cells to the surface; 2 – cell migration across the surface; 3 – formation of microcolonies; 4 – formation of the extracellular polymer matrix and multicellular layer; 5 – formation of macrocolonies; 6 – biofilm dispersion

нии: бактерии теряют подвижность, слипаются друг с другом и происходит агрегация клеток, прикрепившихся к твердой поверхности. Клетки начинают синтезировать и выделять экзополимеры, формируя внеклеточный полимерный матрикс. Затем они образуют многоклеточный слой. При достижении определенной толщины слоя клеток и в результате их деления возникают микроколонии, объединенные внеклеточным полимерным матриксом. Микроколонии постепенно увеличиваются в размерах и объединяются с образованием макроколоний. Одновременно с этим формируются специфические структуры биопленки – полости, выросты, поры и каналы [49, 50]. Возможность роста и развития биопленки лимитирована доступностью питательных веществ и кислорода, диффузией их в различные слои биопленки, эффективностью удаления продуктов метаболизма, *pH* среды и т.д. Завершающей стадией является дисперсия биопленки. В определенный момент времени она достигает предельных размеров и критической массы. От наружных слоев биопленки открепляются клетки и колонизируют другие поверхности. Это может быть обусловлено как внешними (движение жидкости), так и внутренними причинами. Таким образом, цикл повторяется.

**О влиянии бактериальных биопленок на коррозию металлов.** Способность бактерий к формированию биопленок кроме больших проблем в медицине, вызывает серьезные трудности в промышленности. Биопленки вызывают биокоррозию трубопроводов, обрастание различного технологического оборудования, корпусов судов, нефтяных платформ. В пищевой промышленности образование биопленок на продуктах повышает риск заражения пищи патогенными микроорганизмами и возникновения инфекций у людей. В природных условиях биопленки могут вызывать ухудшение экологической обстановки, например, образование цианобактериальной пленки на поверхности водоемов приводит к ухудшению снабжения водных организмов кислородом и нежелательным изменениям качества воды.

В настоящее время хорошо изучена биокоррозия металлов и сплавов в условиях

воздействия бактериальных биопленок. Изучению вопросов микробиологической коррозии сталей в условиях взаимодействия с бактериальными биопленками посвящено очень много работ. В работах [51-65] сообщается об исследованиях коррозии различных сталей в морской воде под влиянием бактериальной биопленки. В этих работах обсуждаются различные примеры взаимодействия бактерий и металлических поверхностей.

Принято считать, что взаимодействие бактерий с металлическими поверхностями всегда вызывает увеличение скорости коррозии. Однако некоторые бактерии могут снижать скорость коррозии различных металлов и сплавов во многих агрессивных средах. Например, было обнаружено, что некоторые штаммы *Shewanella* могут предотвращать точечную коррозию алюминиевого сплава 2024, потускнение латуни и ржавление низкоуглеродистой стали в модельных средах. При уничтожении биопленки путем воздействия на нее антибиотиков, коррозионное воздействие возобновляется [40].

Присутствие микробного сообщества оказывает влияние на процессы деградации металлических поверхностей в естественной соленой воде. Наличие или отсутствие потока воды при формировании биопленок на металлических поверхностях является важным аспектом, влияющим на коррозию металлов [66, 67]. Изучению вопросов микробной колонизации металлических поверхностей и влияния биопленок на коррозию металлов в морской среде посвящено много исследований [68-72].

В настоящее время общепризнано, что в аэробных условиях электрохимически активные биопленки вызывают восстановление кислорода на поверхности нержавеющей стали, находящейся в морской воде [73]. Так, в работе [74] исследовано влияние кислорода и образование биопленок на щелевую коррозию стали в морской воде. Наиболее сильное разрушение в условиях воздействия биопленки было зафиксировано при недостатке кислорода. Исследование поверхности образцов, экспонированных в природной морской воде, показало, что морфология и структура образующих-

ся биопленок различны для разных сплавов. На поверхности легированной стали 12X18H10T структуру биопленки составляют разрозненные колонии, покрывающие не более 20% поверхности. На поверхности алюминиевого сплава АМг5 и стали Ст3 микроорганизмы образуют сплошную пленку с площадью покрытия поверхности 93...95%. Как отмечают авторы работ [75, 76], образование неоднородных по структуре бактериальных пленок на поверхности металлических материалов ведет к созданию химической гетерогенности локальной коррозионной среды на границе металл / биопленка, следствием чего является возникновение локальных гальванических пар на металлической поверхности. Колонизация металлов бактериями с образованием ими неоднородной биопленки ведет к усилению электрохимической гетерогенности их поверхности.

Самостоятельной и весьма серьезной проблемой является биокоррозия в нефтегазовой промышленности. Огромный финансовый ущерб наносят биоповреждения и биоразрушения внутренних и внешних поверхностей трубопроводов из низколегированной стали [77]. Внешняя коррозия подземных труб из углеродистой стали представляет собой проблему глобального масштаба, затрагивающую широкий спектр отраслей промышленности. Доказано, что основным коррозионно-активным агентом в данных условиях является биопленка микроорганизмов. Биопленки способны продуцировать и выделять разнообразные ферменты и метаболиты, изменяющие локальную кислотность, создающие пары дифференциальной аэрации. За счет изменения скорости метаболизма биопленки постоянно меняется скорость коррозии [78]. Микроорганизмы способны использовать в метаболизме электроны, высвобождающиеся за счет окисления металла [79].

### Литература

1. <https://www.popularmechanics.com/military/research/news/a22960/air-force-plane-eating-bacteria/>
2. Kakooei S., Ismail M.C., Ariwahjoedi B. Mechanisms of microbiologically influenced corrosion: A Review // World Applied Sciences Journal. – 2012. – V. 17, № 4. – P. 524-531.
3. Little B. J., Lee J. S. Microbiologically influenced corrosion: an update // International Materials Reviews. – 2014. – V. 59, № 7. – P. 384-393. doi: 10.1179/1743280414y.0000000003
4. Nelson V.V., Maria O.T., Mamiè S.V., Maritza P.C. Microbiologically Influenced Corrosion in Aluminium Alloys 7075 and 2024 / Aluminium Alloys – Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications. Chapter 12. – 2017. – P. 226-242. doi: 10.5772/intechopen.70735
5. Telegdi J., Shaban A., Trif L. Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2020. – V. 9, № 1. – P. 1-33. doi: 10.17675/2305-6894-2020-9-1-1
6. Khan M A. A., Hussain M., Djavanroodi F. Microbiologically influenced corrosion in oil and gas industries: A review // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2021. – V. 10, № 1. – P. 80-106. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-5
7. Okorie I.E., Chukwudi N.R. A review of fungal influenced corrosion of metals // Zastita Materijala. – 2021. – V. 62, № 4. – P. 333-339. doi: 10.5937/zasmat2104333O
8. Beech I.B., Sunner J. Biocorrosion: towards understanding interaction biofilms and metals // Current Opinion in Biotechnology. – 2004. – V. 15, № 3. – P. 181-186. doi: 10.1016/j.copbio.2004.05.001
9. Costerton J.W., Geesey G.G., Cheng K-J. How bacteria stick // Scientific American. 1978. – V. 238, № 1. – P. 86-95. doi: 10.1038/scientificamerican0178-86.
10. Miller M.B., Bassler B.L. Quorum Sensing in Bacteria // Annual Review of Microbiology. – 2001. – V. 55, № 1. – P. 165-199. doi: 10.1146/annurev.micro.55.1.16
11. Andrews J.S., Rolfe S.A., Huang W.E., Scholes J.D., Banwart S.A. Biofilm formation in environmental bacteria is influenced by different macromolecules depending on genus and species // Environmental Microbiology. – 2010. – V. 12, № 9. – P. 2496-2507. doi: 10.1111/j.1462-2920.2010.02223.x
12. Harding M.W., Marques L., Howard R.J., Olson M.E. Can filamentous fungi form biofilms? // Trends in Microbiology. – 2009.

– V. 17, № 11. – P. 475-480. doi: 10.1016/j.tim.2009.08.007

13. Oshiro K.G.N., Rodrigues G., Monges B.E.D., Cardoso M.H., Franco O.L. Bioactive Peptides Against Fungal Biofilms // *Frontiers in Microbiology*. – 2019. – V. 10. Article number 2169. doi: 10.3389/fmicb.2019.02169

14. Booth S.C., Workentine M.L., Wen J., Shaykhutdinov R., Vogel H.J., Ceri H., Weljie A.M. Differences in Metabolism between the Biofilm and Planktonic Response to Metal Stress // *Journal of Proteome Research*. – 2011. – V. 10, № 7. – P. 3190-3199. doi: 10.1021/pr2002353

15. Donlan R.M. Biofilms: Microbial Life on Surfaces // *Emerging Infectious Diseases*. – 2002. – V. 8, № 9. – P. 881-890. doi: 10.3201/eid0809.020063

16. Корякова М.Д., Чеботкевич Е.Г., Каплин Ю.М. О влиянии биологического фактора на коррозию металлов в морской воде. // *Защита металлов*. – 1990. – Т. 26, № 4. – С. 652-656.

17. Жиглецова С.К., Родин В.Б., Кобелев В.С., Александрова Н.В., Расулова Г.Е., Холоденко В.П. Исследование начальных этапов биокоррозии стали // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2000. – Т. 36, № 6. – С. 637-641.

18. Коровин Ю.М., Леденев А.В., Лукашев Ю.Ф., Чжу В.П. Коррозионная стойкость и микрообрастание металлов в Центральной Атлантике // *Защита металлов*. – 1991. – Т. 27, № 1. – С. 92-101.

19. Борщевский А.М., Великанов Т.Д., Павловец Н.М. Влияние железобактерий на коррозию углеродистой стали в водопроводной воде г. Санкт-Петербурга // *Защита металлов*. – 1994. – Т. 30, № 4. – С. 364-368.

20. Arampatzis S., Giannoglou G.D., Diza E. Biofilm formation: A complicated microbiological process // *Aristotle University Medical Journal*. – 2011. – V. 38, № 2. – P. 21-29.

21. Stoodley P., Sauer K., Davies D. G., Costerton J.W. Biofilms as Complex Differentiated Communities // *Annual Review of Microbiology*. – 2002. – V. 56, № 1. – P. 187-209. doi: 10.1146/annurev.micro.56.012302.160705

22. Lewandowski Z. Structure and function of biofilms. In: Evans LV, editor. *Biofilms: recent advances in their study and control*.

Amsterdam: Harwood Academic Publishers. – 2000. – P. 1-17.

23. Zhang Y., Lin Y., Lv X., Xu A., Feng C., Lin J. Low-Field Nuclear Magnetic Resonance Characteristics of Biofilm Development Process // *Microorganisms*. – 2021. – V. 9. Article number 2466. doi: 10.3390/microorganisms9122466

24. Ozer E., Yaniv K., Chetrit E., Boyarski A., Meijler M.M., Berkovich R., Kushmaro A., Alfonta L. An inside look at a biofilm: *Pseudomonas aeruginosa* flagella biotracking // *Science advances*. – 2021. – V. 7, № 24. Article number eabg8581. doi: 10.1126/sciadv.abg8581

25. Konduri R., Saiabhilash C.R., Shivaji S. Biofilm-Forming Potential of Ocular Fluid *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus epidermidis* on Ex Vivo Human Corneas from Attachment to Dispersal Phase // *Microorganisms*. – 2021. – V. 9, № 6. Article number 1124. doi: 10.3390/microorganisms9061124

26. Guzmán-Soto I., McTiernan C., Gonzalez-Gomez M., Ross A., Gupta K., Suuronen E.J., Alarcon E.I. Mimicking biofilm formation and development: Recent progress in in vitro and in vivo biofilm models // *iScience*. – 2021. – V. 24, № 5. Article number 102443. doi: 10.1016/j.isci.2021.102443

27. Siddam A.D., Zaslow S.J., Wang Y., Phillips K.S., Silverman M.D., Regan P.M., Amarasinghe J.J. Characterization of Biofilm Formation by *Mycobacterium chimaera* on Medical Device Materials // *Frontiers in Microbiology*. – 2021. Article number 586657. doi: 10.3389/fmicb.2020.586657

28. More T.T., Yadav J.S., Yan S., Tyagi R.D., Surampalli R.Y. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications // *Journal of Environmental Management*. – 2014. – V. 144. – P. 1-25. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.05.010.

29. Sreeremya S.A Review on Microbial Biofilm // *International Journal of Advance Research and Development*. – 2017. – V. 2, № 2. – P. 7-10.

30. Lehner A., Riedel K., Eberl L., Breeuwer P., Diep B., Stephan R. Biofilm Formation, Extracellular Polysaccharide Production, and Cell-to-Cell Signaling in Various *Enterobacter sakazakii* Strains: Aspects Promoting



Environmental Persistence // Journal of Food Protection. – 2005. – V. 68, № 11. – P. 2287-2294. doi: 10.4315/0362-028x-68.11.2287

31. Denkhaus E., Meisen S., Telgheder U., Wingender J. Chemical and physical methods for characterisation of biofilms // Microchimica Acta. – 2006. – V. 158, № 1-2. – P. 1-27. doi: 10.1007/s00604-006-0688-5

32. Characklis W.G., McFeters G.A., Marshall K.C. Physiological ecology in biofilm systems. In: Characklis W.G., Marshall K.C. Biofilms. / New York: John Wiley & Sons; – 1990. – P. 341-394.

33. Fletcher M., Loeb G.I. Influence of substratum characteristics on the attachment of a marine pseudomonad to solid surfaces // Applied and Environmental Microbiology. – 1979. – V. 37, № 1. – P. 67-72. doi: 10.1128/aem.37.1.67-72.1979

34. Pringle J.H., Fletcher M. Influence of substratum wettability on attachment of freshwater bacteria to solid surfaces // Applied and Environmental Microbiology. – 1983. – V. 45, № 3. – P. 811-817. doi: 10.1128/aem.45.3.811-817.1983

35. Bendinger B., Rijnaarts H. H., Altendorf K., Zehnder A.J. Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids // Applied and Environmental Microbiology. – 1993. – V. 59, № 11. – P. 3973-3977. doi: 10.1128/aem.59.11.3973-3977.1993

36. Rosenberg M., Bayer E.A., Delarea J., Rosenberg E. Role of Thin Fimbriae in Adherence and Growth of *Acinetobacter calcoaceticus* RAG-1 on Hexadecane // Applied and Environmental Microbiology. – 1982. – V. 44, № 4. – P. 929-937. doi: 10.1128/aem.44.4.929-937.1982

37. Cowan M.M., Warren T.M., Fletcher M. Mixed-species colonization of solid surfaces in laboratory biofilms // Biofouling. – 1991. – V. 3. – P. 23-34. doi: 10.1080/08927019109378159

38. Bullitt E., Makowski L. Structural polymorphism of bacterial adhesion pili // Nature. – 1995. – V. 373, № 6510. – P. 164-167. doi: 10.1038/373164a0

39. Bendinger B., Rijnaarts H.H., Altendorf K., Zehnder A.J. Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids // Applied and Environmental

Microbiology. – 1993. – V. 59, № 11. – P. 3973-3977. doi: 10.1128/aem.59.11.3973-3977.1993

40. Mansfeld F. The interaction of bacteria and metal surfaces // Electrochimica Acta. – 2007. – V. 52, № 27. – P. 7670-7680. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.006

41. Nwodo U., Ezeikel G., Okoh A. Bacterial exopolysaccharides: functionality and prospects // International journal of molecular sciences. – 2012. – V. 13, № 11. – P. 14002-14015. doi: 10.3390/ijms131114002

42. Beech I.B., Gaylarde C.C. Adhesion of *Desulfovibrio desulfuricans* and *Pseudomonas fluorescens* to mild steel surfaces // Journal of Applied Bacteriology. – 1989. – V. 67, № 2. – P. 201-207. doi: 10.1111/j.1365-2672.1989.tb03396.x

43. Beech I.B., Gaylarde C.C., Smith J.J., Geesey G.G. Extracellular polysaccharides from *Desulfovibrio desulfuricans* and *Pseudomonas fluorescens* in the presence of mild and stainless steel // Applied Microbiology and Biotechnology. – 1991. – V. 35, № 1. – P. 65-71. doi: 10.1007/BF00180638

44. Zottola E.A. Characterization of the attachment matrix of *Pseudomonas fragi* attached to nonporous surfaces // Biofouling. – 1991. – V. 5, № 1-2. – P. 37-55. doi: 10.1080/08927019109378227

45. Zhang H., Tian Y., Wan J., Zhao P. Study of Biofilm Influenced Corrosion on Cast Iron Pipes in Reclaimed Water // Applied Surface Science. – 2015. – V. 357. – P. 236-247. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.09.021

46. Geweely N.S.I. Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over the River Nile, Egypt // Biodegradation. – 2010. – V. 22, № 2. – P. 243-252. doi: 10.1007/s10532-010-9391-7

47. Song-Mei L., Yuan-Yuan Z., Ru-Bing B., Jian-Hua L. Mei Y. Corrosion Behavior of Steel A3 under the Combined Effect of *Streptomyces* and *Nocardia* sp. // Acta Physico-Chimica Sinica. – 2009. – V. 25, № 5. – P. 921-927. doi: 10.3866/PKU.WHXB20090518

48. Tran T.T.T., Kannoorpatti K., Padovan A., Thennadil S.N. A study of bacteria adhesion and microbial corrosion on different stainless steels in environment containing *Desulfovibrio vulgaris* // Royal Society Open Science. – 2021. – V. 8, № 1. Article number 201577. doi: 10.1098/rsos.201577

49. Donlan R.M. Biofilm elimination on intravascular catheters: important considerations for the infectious disease practitioner // *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*. – 2011. – V. 52, № 8. – P. 1038-1045. doi: 10.1093/cid/cir077
50. Popat R., Crusz S.A., Messina M., Williams P., West S.A., Diggle S.P. Quorum-sensing and cheating in bacterial biofilms // *Proceedings. Biological sciences*. – 2012. – V. 279, № 1748. – P. 4765-4771. doi: 10.1098/rspb.2012.1976
51. Zhang T., Fang H.H.P., Ko B.C.B. Methanogen population in a marine biofilm corrosive to mild steel // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2003. – V. 63, № 1. – P. 101-106. doi: 10.1007/s00253-003-1396-2
52. Dinh H.T., Kuever J., Mubmann M., Hassel A.W., Stratmann M., Widdel, F. Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms // *Nature*. – 2004. – V. 427, № 6977. – P. 829-832. doi: 10.1038/nature02321
53. Acuña N., Ortega-Morales B.O., Valadez-González A. Biofilm Colonization Dynamics and Its Influence on the Corrosion Resistance of Austenitic UNS S31603 Stainless Steel Exposed to Gulf of Mexico Seawater // *Marine Biotechnology*. – 2006. – V. 8, № 1. – P. 62-70. doi: 10.1007/s10126-005-5145-7
54. Miranda E., Bethencourt M., Botana F. J., Cano M.J., Sánchez-Amaya J.M., Corzo A., Ollivier B. Biocorrosion of carbon steel alloys by an hydrogenotrophic sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio capillatus* isolated from a Mexican oil field separator // *Corrosion Science*. – 2006. – V. 48, № 9. – P. 2417-2431. doi: 10.1016/j.corsci.2005.09.005
55. Lopes F.A., Morin P., Oliveira R., Melo L.F. Interaction of *Desulfovibrio desulfuricans* biofilms with stainless steel surface and its impact on bacterial metabolism // *Journal of Applied Microbiology*. – 2006. – V. 101, № 5. – P. 1087-1095. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.03001.x
56. Çetin D., Bilgiç S., Dönmez G. Biocorrosion of Low Alloy Steel by *Desulfotomaculum* sp. and Effect of Biocides on Corrosion Control // *ISIJ International*. – 2007. – V. 47, № 7. – P. 1023-1028. doi: 10.2355/isijinternational.47.1023
57. İlhan-Sungur E., Cansever N., Cotuk A. Microbial corrosion of galvanized steel by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (*Desulfovibrio* sp.) // *Corrosion Science*. – 2007. – V. 49, № 3. – P. 1097-1109. doi: 10.1016/j.corsci.2006.05.050
58. Duan J., Wu S., Zhang X., Huang G., Du M., Hou B. Corrosion of carbon steel influenced by anaerobic biofilm in natural seawater // *Electrochimica Acta*. – 2008. – V. 54, № 1. – P. 22-28. doi: 10.1016/j.electacta.2008.04.085
59. Cetin D., Aksu M.L. Corrosion behavior of low-alloy steel in the presence of *Desulfotomaculum* sp. // *Corrosion Science*. – 2009. – V. 51, № 8. – P. 1584-1588. doi: 10.1016/j.corsci.2009.04.001
60. Païssé S., Ghiglione J.-F., Marty F., Abbas B., Gueuné H., Amaya J.M.S., Quillet L. Sulfate-reducing bacteria inhabiting natural corrosion deposits from marine steel structures // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2012. – V. 97, № 16. – P. 7493-7504. doi: 10.1007/s00253-012-4464-7
61. Wikieł A.J., Datsenko I., Vera M., Sand W. Impact of *Desulfovibrio alaskensis* biofilms on corrosion behaviour of carbon steel in marine environment // *Bioelectrochemistry*. – 2014. – V. 9, № 7. – P. 52-60. doi: 10.1016/j.bioelechem.2013.09.008
62. Zhang P., Xu D., Li Y., Yang K., Gu T. Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm // *Bioelectrochemistry*. – 2015. – V. 101. – P. 14-21. doi: 10.1016/j.bioelechem.2014.06.010
63. McBeth J.M., Emerson D. In Situ Microbial Community Succession on Mild Steel in Estuarine and Marine Environments: Exploring the Role of Iron-Oxidizing Bacteria // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – V. 7. Article number 767. doi: 10.3389/fmicb.2016.00767
64. Zhang Y., Pei G., Chen L., Zhang W. Metabolic dynamics of *Desulfovibrio vulgaris* biofilm grown on a steel surface // *Biofouling (Journal of Bioadhesion and Biofilm Research)*. – 2016. – V. 32, № 7. – P. 725-736. doi: 10.1080/08927014.2016.1193166
65. Li X., Duan J., Xiao H., Li Y., Liu H., Guan F., Zhai X. Analysis of Bacterial Community Composition of Corroded Steel Immersed in Sanya and Xiamen Seawaters in China via Method of Illumina MiSeq Sequencing. //

Frontiers in Microbiology. – 2017. – V. 8. Article number 1737. doi: 10.3389/fmicb.2017.01737

66. Beech I.B., Sunner J. Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2004. – V. 15, № 3. – P. 181-186. doi: 10.1016/j.copbio.2004.05.001

67. Rufino B.N., Procópio L. Influence of Salt Water Flow on Structures and Diversity of Biofilms Grown on 316L Stainless Steel // *Current Microbiology*. – 2021. – V. 78, № 9. – P. 3394-3402. doi: 10.1007/s00284-021-02596-5

68. Neria-González I., Wang E.T., Ramírez F., Romero J.M., Hernández-Rodríguez C. Characterization of bacterial community associated to biofilms of corroded oil pipelines from the southeast of Mexico // *Anaerobe*. – 2006. – V. 12, № 3. – P. 122-133. doi: 10.1016/j.anaerobe.2006.02.001

69. Lee J.-W., Nam J.-H., Kim Y.-H., Lee K.-H., Lee D.-H. Bacterial communities in the initial stage of marine biofilm formation on artificial surfaces // *The Journal of Microbiology*. – 2008. – V. 46, № 2. – P. 174-182. doi: 10.1007/s12275-008-0032-3

70. Kip N., van Veen J.A. The dual role of microbes in corrosion // *The ISME Journal*. – 2014. – V. 9, № 3. – P. 542-551. doi: 10.1038/ismej.2014.169

71. Dang H., Lovell C.R. Microbial Surface Colonization and Biofilm Development in Marine Environments // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2015. – V. 80, № 1. – P. 91-138. doi: 10.1128/mmb.00037-15

72. Tadros H.R.Z., Naggar M.F.E., Barakat K.M.I., Abou-Taleb A.E.A., Zaghloul F.A.E.R. Impact of Some Physicochemical and Biological Factors on Steel Corrosion in Seawater // *Asian journal of advanced basic sciences*. – 2015. – V. 3, № 2. – P. 64-73

73. Faimali M., Chelossi E., Pavanello G., Benedetti A., Vandecandelaere I., De Vos P., Mollica A. Electrochemical activity and bacterial diversity of natural marine biofilm in laboratory closed-systems // *Bioelectrochemistry*. – 2010. – V. 78, № 1. – P. 30-38. doi: 10.1016/j.bioelechem.2009.04.012

74. Machuca L.L., Bailey S.I., Gubner R., Watkin E.L.J., Ginige M.P., Kaksonen A.H., Heidersbach K. Effect of oxygen and biofilms on crevice corrosion of UNS S31803 and UNS N08825 in natural seawater // *Corrosion*

*Science*. – 2013. – V. 67. – P. 242-255. doi: 10.1016/j.corsci.2012.10.023

75. Харченко У.В. Влияние аэробных морских бактерий на катодное поведение некоторых сплавов в морской воде // *Коррозия: материалы, защита*. – 2005. – № 5. – С. 46-48.

76. Корякова М.Д., Никитин В.М., Супонина А.П., Звягинцев А.Ю., Харченко У.В. Обрастание и биокоррозия высоколегированной стали в бухте Золотой Рог // *Защита металлов*. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 544-548.

77. Little B.J., Lee J.S. Microbiologically Influenced Corrosion. 2007. 1-st edn. Hoboken, John Wiley and Sons, New Jersey. doi: 10.1002/9781119019213.ch27

78. Usher K.M., Kaksonen A.H., Cole I., Marney D. Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2014. – V. 93. – P. 84-106. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.05.007

79. Kato S. Microbial extracellular electron transfer and its relevance to iron corrosion // *Microbial Biotechnology*. – 2016. – V. 9, № 2. – P. 141-148. doi: 10.1111/1751-7915.12340

## References

1. <https://www.popularmechanics.com/military/research/news/a22960/air-force-plane-eating-bacteria/>

2. Kakooei, S., Ismail, M. C., Ariwahjoedi, B. (2012). Mechanisms of microbiologically influenced corrosion: A Review. *World Applied Sciences Journal*, 17(4), 524-531.

3. Little, B. J., Lee, J. S. (2014). Microbiologically influenced corrosion: an update. *International Materials Reviews*, 59(7), 384-393. doi: 10.1179/1743280414y.0000000003

4. Nelson, V. V., Maria, O. T., Mamiè, S. V., Maritza, P. C. (2017). Microbiologically Influenced Corrosion in Aluminium Alloys 7075 and 2024. *Aluminium Alloys – Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*. Chapter 12. 226-242. doi: 10.5772/intechopen.70735

5. Telegdi, J., Shaban, A., Trif, L. (2020). Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(1), 1-33. doi: 10.17675/2305-6894-2020-9-1-1

6. Khan, M. A. A., Hussain, M., Djavanroodi,



- F. (2021). Microbiologically influenced corrosion in oil and gas industries: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 80-106. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-5
7. Okorie, I. E., Chukwudi, N. R. (2021). A review of fungal influenced corrosion of metals. *Zastita Materijala*, 62(4), 333-339. doi: 10.5937/zasmat2104333O
8. Beech, I. B., Sunner, J. (2004). Biocorrosion: towards understanding interaction biofilms and metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 181-186. doi: 10.1016/j.copbio.2004.05.001
9. Costerton, J. W., Geesey, G. G., Cheng, K.-J. (1978). How bacteria stick. *Scientific American*, 238(1), 86-95. doi: 10.1038/scientificamerican0178-86
10. Miller, M. B., Bassler, B. L. (2001). Quorum Sensing in Bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55(1), 165-199. doi: 10.1146/annurev.micro.55.1.16
11. Andrews, J. S., Rolfe, S. A., Huang, W. E., Scholes, J. D., Banwart, S. A. (2010). Biofilm formation in environmental bacteria is influenced by different macromolecules depending on genus and species. *Environmental Microbiology*, 12(9), 2496-2507. doi: 10.1111/j.1462-2920.2010.02223.x
12. Harding, M. W., Marques, L., Howard, R. J., Olson, M. E. (2009). Can filamentous fungi form biofilms? *Trends in Microbiology*, 17(11), 475-480. doi: 10.1016/j.tim.2009.08.007
13. Oshiro, K. G. N., Rodrigues, G., Monges, B. E. D., Cardoso, M. H., Franco, O. L. (2019). Bioactive Peptides Against Fungal Biofilms. *Frontiers in Microbiology*, 10. Article number 2169. doi: 10.3389/fmicb.2019.02169
14. Booth, S. C., Workentine, M. L., Wen, J., Shaykhutdinov, R., Vogel, H. J., Ceri, H., Weljie, A. M. (2011). Differences in Metabolism between the Biofilm and Planktonic Response to Metal Stress. *Journal of Proteome Research*, 10(7), 3190-3199. doi: 10.1021/pr2002353
15. Donlan, R. M. (2002). Biofilms: Microbial Life on Surfaces. *Emerging Infectious Diseases*, 8(9), 881-890. doi: 10.3201/eid0809.020063.
16. Koryakova, M. D., Chebotkevich, E. G., Kaplin, Yu. M. (1990). On the influence of the biological factor on the corrosion of metals in sea water. *Protection of metals*, 26(4), 652-656.
17. Zhigletsova, S. K., Rodin, V. B., Kobelev, V. C., Alexandrova, N. V., Rasulova, G. E., Kholodenko, V. P. (2000). Study of the initial stages of steel biocorrosion. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 36(6), 637-641.
18. Korovin, Yu. M., Ledenev, A. V., Lukashev, Yu. F., Zhu, V. P. (1991). Corrosion resistance and microfouling of metals in the Central Atlantic. *Protection of metals*, 27(1), 92-101.
19. Borshchevsky, A. M., Velikanov T. D., Pavlovets N. M. (1994). Influence of iron-oxidizing bacteria on carbon steel corrosion in St. Petersburg tap water. *Protection of Metals*, 30(4), 364-368.
20. Arampatzi, S., Giannoglou, G. D., Diza, E. (2011). Biofilm formation: A complicated microbiological process. *Aristotle University Medical Journal*, 38(2), 21-29.
21. Stoodley, P., Sauer, K., Davies, D. G. & Costerton, J. W. (2002). Biofilms as Complex Differentiated Communities. *Annual Review of Microbiology*, 56(1), 187-209. doi: 10.1146/annurev.micro.56.012302.160705
22. Lewandowski, Z. (2000). Structure and function of biofilms. In: Evans L. V., editor. *Biofilms: recent advances in their study and control*. Amsterdam: Harwood Academic Publishers; P. 1-17.
23. Zhang, Y., Lin, Y., Lu, X., Xu, A., Feng, C., Lin, J. (2021). Low-Field Nuclear Magnetic Resonance Characteristics of Biofilm Development Process. *Microorganisms*, 9(2466). doi: 10.3390/microorganisms9122466
24. Ozer, E., Yaniv, K., Chetrit, E., Boyarski, A., Meijler, M. M., Berkovich, R., Kushmaro, A., Alfonta, L. (2021). An inside look at a biofilm: *Pseudomonas aeruginosa* flagella biotracking. *Science advances*, 7(24), Article number eabg8581. doi: 10.1126/sciadv.abg8581
25. Konduri, R., Saiabhilash, C. R., Shivaji, S. (2021). Biofilm-Forming Potential of Ocular Fluid *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus epidermidis* on Ex Vivo Human Corneas from Attachment to Dispersal Phase. *Microorganisms*, 9(6), Article number 1124. doi: 10.3390/microorganisms9061124
26. Guzmán-Soto, I., McTiernan, C., Gonzalez-Gomez, M., Ross, A., Gupta, K., Suuronen, E. J., Alarcon, E. I. (2021). Mimicking biofilm formation and development: Recent progress in in vitro and in vivo biofilm models. *iScience*, 24(5), Article number 102443. doi: 10.1016/j.isci.2021.102443



27. Siddam, A. D., Zaslow, S. J., Wang, Y., Phillips, K. S., Silverman, M. D., Regan, P. M., Amarasinghe, J. J. (2021). Characterization of Biofilm Formation by Mycobacterium chimaera on Medical Device Materials. *Frontiers in Microbiology*, Article number 586657. doi: 10.3389/fmicb.2020.586657
28. More, T. T., Yadav, J. S., Yan, S., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y. (2014). Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. *Journal of Environmental Management*, 144, 1-25. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.05.010
29. Sreeremya, S. A (2017). Review on Microbial Biofilm. *International Journal of Advance Research and Development*, 2(2), 7-10.
30. Lehner, A., Riedel, K., Eberl, L., Breeuwer, P., Diep, B., Stephan, R. (2005). Biofilm Formation, Extracellular Polysaccharide Production, and Cell-to-Cell Signaling in Various Enterobacter sakazakii Strains: Aspects Promoting Environmental Persistence. *Journal of Food Protection*, 68(11), 2287-2294. doi: 10.4315/0362-028x-68.11.2287
31. Denkhaus, E., Meisen, S., Telgheder, U., Wingender, J. (2006). Chemical and physical methods for characterisation of biofilms. *Microchimica Acta*, 158(1-2), 1-27. doi: 10.1007/s00604-006-0688-5
32. Characklis, W. G., McFeters, G. A., Marshall, K. C. (1990). Physiological ecology in biofilm systems. In: Characklis W. G., Marshall K. C. *Biofilms*. New York: John Wiley & Sons, 341-394.
33. Fletcher, M., Loeb, G. I. (1979). Influence of substratum characteristics on the attachment of a marine pseudomonad to solid surfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 37(1), 67-72. doi: 10.1128/aem.37.1.67-72.1979
34. Pringle, J. H., Fletcher, M. (1983). Influence of substratum wettability on attachment of freshwater bacteria to solid surfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 45(3), 811-817. doi: 10.1128/aem.45.3.811-817.1983
35. Bendinger, B., Rijnaarts, H. H., Altendorf, K., Zehnder, A. J. (1993). Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(11), 3973-3977. doi: 10.1128/aem.59.11.3973-3977.1993
36. Rosenberg, M., Bayer, E. A., Delarea, J., Rosenberg, E. (1982). Role of Thin Fimbriae in Adherence and Growth of Acinetobacter calcoaceticus RAG-1 on Hexadecane. *Applied and Environmental Microbiology*, 44(4), 929-937. doi: 10.1128/aem.44.4.929-937.1982
37. Cowan, M. M., Warren, T. M., Fletcher, M. (1991). Mixed-species colonization of solid surfaces in laboratory biofilms. *Biofouling*, 3, 23-34. doi: 10.1080/08927019109378159
38. Bullitt, E., Makowski, L. (1995). Structural polymorphism of bacterial adhesion pili. *Nature*, 373(6510), 164-167. doi: 10.1038/373164a0
39. Bendinger, B., Rijnaarts, H. H., Altendorf, K., Zehnder, A. J. (1993). Physicochemical cell surface and adhesive properties of coryneform bacteria related to the presence and chain length of mycolic acids. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(11), 3973-3977. doi: 10.1128/aem.59.11.3973-3977.1993
40. Mansfeld, F. (2007). The interaction of bacteria and metal surfaces. *Electrochimica Acta*, 52(27), 7670-7680. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.006
41. Nwodo, U., Ezeikel, G., Okoh, A. (2012). Bacterial exopolysaccharides: functionality and prospects. *International journal of molecular sciences*, 13(11), 14002-14015. doi: 10.3390/ijms131114002
42. Beech, I. B., Gaylarde, C. C. (1989). Adhesion of Desulfovibrio desulfuricans and Pseudomonas fluorescens to mild steel surfaces. *Journal of Applied Bacteriology*, 67(2), 201-207. doi: 10.1111/j.1365-2672.1989.tb03396.x
43. Beech, I. B., Gaylarde, C. C., Smith, J. J., Geesey, G. G. (1991). Extracellular polysaccharides from Desulfovibrio desulfuricans and Pseudomonas fluorescens in the presence of mild and stainless steel. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 35(1), 65-71. doi: 10.1007/BF00180638
44. Zottola, E. A. (1991). Characterization of the attachment matrix of Pseudomonas fragi attached to nonporous surfaces. *Biofouling*, 5(1-2), 37-55. doi: 10.1080/08927019109378227
45. Zhang, H., Tian, Y., Wan, J., Zhao, P. (2015). Study of Biofilm Influenced Corrosion on Cast Iron Pipes in Reclaimed Water. *Applied Surface Science*, 357, 236-247. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.09.021
46. Geweely, N. S. I. (2010). Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over

the River Nile, Egypt. *Biodegradation*, 22(2), 243-252. doi: 10.1007/s10532-010-9391-7

47. Song-Mei, L., Yuan-Yuan, Z., Ru-Bing, B., Jian-Hua, L. Mei, Y. (2009). Corrosion Behavior of Steel A3 under the Combined Effect of Streptomyces and Nocardia sp. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 25(5), 921-927. doi: 10.3866/PKU.WHXB20090518

48. Tran, T. T. T., Kannoorpatti, K., Padovan, A., Thennadil, S. N. (2021). A study of bacteria adhesion and microbial corrosion on different stainless steels in environment containing *Desulfovibrio vulgaris*. *Royal Society Open Science*, 8(1), Article number 201577. doi: 10.1098/rsos.201577

49. Donlan, R. M. (2011). Biofilm elimination on intravascular catheters: important considerations for the infectious disease practitioner. *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 52(8), 1038-1045. doi: 10.1093/cid/cir077

50. Popat, R., Crusz, S. A., Messina, M., Williams, P., West, S. A., Diggle, S. P. (2012). Quorum-sensing and cheating in bacterial biofilms. *Proceedings. Biological sciences*, 279(1748), 4765-4771. doi: 10.1098/rspb.2012.1976

51. Zhang, T., Fang, H. H. P., Ko, B. C. B. (2003). Methanogen population in a marine biofilm corrosive to mild steel. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(1), 101-106. doi: 10.1007/s00253-003-1396-2

52. Dinh, H. T., Kuever, J., Mußmann, M., Hassel, A. W., Stratmann, M., Widdel, F. (2004). Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature*, 427(6977), 829-832. doi: 10.1038/nature02321

53. Acuña, N., Ortega-Morales, B. O., Valadez-González, A. (2006). Biofilm Colonization Dynamics and Its Influence on the Corrosion Resistance of Austenitic UNS S31603 Stainless Steel Exposed to Gulf of Mexico Seawater. *Marine Biotechnology*, 8(1), 62-70. doi: 10.1007/s10126-005-5145-7

54. Miranda, E., Bethencourt, M., Botana, F. J., Cano, M. J., Sánchez-Amaya, J. M., Corzo, A., Ollivier, B. (2006). Biocorrosion of carbon steel alloys by an hydrogenotrophic sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio capillatus* isolated from a Mexican oil field separator. *Corrosion Science*, 48(9), 2417-2431. doi:

10.1016/j.corsci.2005.09.005

55. Lopes, F. A., Morin, P., Oliveira, R., Melo, L. F. (2006). Interaction of *Desulfovibrio desulfuricans* biofilms with stainless steel surface and its impact on bacterial metabolism. *Journal of Applied Microbiology*, 101(5), 1087-1095. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.03001.x

56. Çetin, D., Bilgiç, S., Dönmez, G. (2007). Biocorrosion of Low Alloy Steel by *Desulfotomaculum* sp. and Effect of Biocides on Corrosion Control. *ISIJ International*, 47(7), 1023-1028. doi: 10.2355/isijinternational.47.1023

57. İlhan-Sungur, E., Cansever, N., Cotuk, A. (2007). Microbial corrosion of galvanized steel by a freshwater strain of sulphate reducing bacteria (*Desulfovibrio* sp.). *Corrosion Science*, 49(3), 1097-1109. doi: 10.1016/j.corsci.2006.05.050

58. Duan, J., Wu, S., Zhang, X., Huang, G., Du, M., Hou, B. (2008). Corrosion of carbon steel influenced by anaerobic biofilm in natural seawater. *Electrochimica Acta*, 54(1), 22-28. doi: 10.1016/j.electacta.2008.04.085

59. Cetin, D., Aksu, M. L. (2009). Corrosion behavior of low-alloy steel in the presence of *Desulfotomaculum* sp. *Corrosion Science*, 51(8), 1584-1588. doi: 10.1016/j.corsci.2009.04.001

60. Païssé, S., Ghiglione, J.-F., Marty, F., Abbas, B., Gueuné, H., Amaya, J. M. S., Quillet, L. (2012). Sulfate-reducing bacteria inhabiting natural corrosion deposits from marine steel structures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(16), 7493-7504. doi: 10.1007/s00253-012-4464-7

61. Wikieł, A. J., Datsenko, I., Vera, M., Sand, W. (2014). Impact of *Desulfovibrio alaskensis* biofilms on corrosion behaviour of carbon steel in marine environment. *Bioelectrochemistry*, 9(7), 52-60. doi: 10.1016/j.bioelechem.2013.09.008

62. Zhang, P., Xu, D., Li, Y., Yang, K., Gu, T. (2015). Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm. *Bioelectrochemistry*, 101, 14-21. doi: 10.1016/j.bioelechem.2014.06.010

63. McBeth, J. M., Emerson, D. (2016). In Situ Microbial Community Succession on Mild Steel in Estuarine and Marine Environments: Exploring the Role of Iron-Oxidizing Bacteria.



*Frontiers in Microbiology*, 7, Article number 767. doi: 10.3389/fmicb.2016.00767

64. Zhang, Y., Pei, G., Chen, L., Zhang, W. (2016). Metabolic dynamics of *Desulfovibrio vulgaris* biofilm grown on a steel surface. *Biofouling (Journal of Bioadhesion and Biofilm Research)*, 32(7), 725-736. doi: 10.1080/08927014.2016.1193166

65. Li, X., Duan, J., Xiao, H., Li, Y., Liu, H., Guan, F., Zhai, X. (2017). Analysis of Bacterial Community Composition of Corroded Steel Immersed in Sanya and Xiamen Seawaters in China via Method of Illumina MiSeq Sequencing. *Frontiers in Microbiology*, 8, Article number 1737. doi: 10.3389/fmicb.2017.01737

66. Beech, I. B., Sunner, J. (2004). Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 181-186. doi: 10.1016/j.copbio.2004.05.001

67. Rufino, B. N., Procópio, L. (2021). Influence of Salt Water Flow on Structures and Diversity of Biofilms Grown on 316L Stainless Steel. *Current Microbiology*, 78(9), 3394-3402. doi: 10.1007/s00284-021-02596-5

68. Neria-González, I., Wang, E. T., Ramírez, F., Romero, J. M., Hernández-Rodríguez, C. (2006). Characterization of bacterial community associated to biofilms of corroded oil pipelines from the southeast of Mexico. *Anaerobe*, 12(3), 122-133. doi: 10.1016/j.anaerobe.2006.02.001

69. Lee, J.-W., Nam, J.-H., Kim, Y.-H., Lee, K.-H., Lee, D.-H. (2008). Bacterial communities in the initial stage of marine biofilm formation on artificial surfaces. *The Journal of Microbiology*, 46(2), 174-182. doi: 10.1007/s12275-008-0032-3

70. Kip, N., van Veen, J. A. (2014). The dual role of microbes in corrosion. *The ISME Journal*, 9(3), 542-551. doi: 10.1038/ismej.2014.169

71. Dang, H., Lovell, C. R. (2015). Microbial Surface Colonization and Biofilm Development in Marine Environments. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(1), 91-138. doi:

10.1128/mmbr.00037-15

72. Tadros, H. R. Z., Naggar, M. F. E., Barakat, K. M. I., Abou-Taleb, A. E. A., Zaghloul, F. A. E. R. (2015). Impact of Some Physicochemical and Biological Factors on Steel Corrosion in Seawater. *Asian journal of advanced basic sciences*, 3(2), 64-73.

73. Faimali, M., Chelossi, E., Pavanello, G., Benedetti, A., Vandecandelaere, I., De Vos, P., Mollica, A. (2010). Electrochemical activity and bacterial diversity of natural marine biofilm in laboratory closed-systems. *Bioelectrochemistry*, 78(1), 30-38. doi: 10.1016/j.bioelechem.2009.04.012

74. Machuca, L. L., Bailey, S. I., Gubner, R., Watkin, E. L. J., Ginige, M. P., Kaksonen, A. H., Heidersbach, K. (2013). Effect of oxygen and biofilms on crevice corrosion of UNS S31803 and UNS N08825 in natural seawater. *Corrosion Science*, 67, 242-255. doi: 10.1016/j.corsci.2012.10.023

75. Kharchenko, U. V. (2005). Influence of aerobic marine bacteria on the cathodic behavior of some alloys in sea water. *Corrosion: materials, protection*, 5, 46-48.

76. Koryakova, M. D., Nikitin, V. M., Suponina, A. P., Zvyagintsev, A. Yu., Kharchenko, U. V. (2002). Fouling and biocorrosion of high-alloy steel in the Zolotoy Rog Bay. *Metal Protection*, 38(5), 544-548.

77. Little, B. J., Lee, J. S. (2007). Microbiologically Influenced Corrosion. 1-st edn. Hoboken, John Wiley and Sons, New Jersey. doi: 10.1002/9781119019213.ch27

78. Usher, K. M., Kaksonen, A. H., Cole, I., Marney, D. (2014). Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 93, 84-106. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.05.007

79. Kato, S. (2016). Microbial extracellular electron transfer and its relevance to iron corrosion. *Microbial Biotechnology*, 9(2), 141-148. doi: 10.1111/1751-7915.12340

#### Информация об авторах

**Белов Денис Владимирович**, к.х.н., доцент, старший научный сотрудник, «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Беляев Сергей Николаевич**, к.х.н., научный сотрудник, «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

#### Information about authors

**Denis V. Belov**, Ph.D. in Chemistry, Associate Professor, Senior Researcher, Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Sergey N. Belyaev**, Ph.D. in Chemistry, Researcher, Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation)



## **ИНГИБИТОР КОРРОЗИИ БУРОВЫХ НАСОСОВ «КАРТЭК-28Б»**

### **ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

Ингибитор «КАРТЭК-28Б» обеспечивает высокоэффективную защиту от коррозии оборудования, изготовленного из разнородных металлов и сплавов, в водных средах – углеродистых и нержавеющих сталей, чугуна, нирезиста, порошковых материалов, латуни и других. Продукт преимущественно применяется для защиты от коррозии буровых насосов в процессе гидроиспытаний, а также теплоэнергетического оборудования – котлов, баков, емкостей, трубопроводов, химических реакторов, в период простаивания.

### **ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Ингибитор «КАРТЭК-28Б» представляет собой концентрированный водный раствор неорганических, комплексообразующих и буферных веществ.

Важным преимуществом ингибитора «КАРТЭК-28Б», в отличие от комплексоноватых, является быстрое нарастание защитного эффекта при воздействии водных сред при обычных и повышенных температурах на разнородные металлы и сплавы, в том числе, серый чугун, что особенно важно при кратковременных гидроиспытаниях без последующей сушки оборудования.

### **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ И ХРАНЕНИЮ**

Концентрация ингибитора, используемая для консервации оборудования, составляет 4 л/м<sup>3</sup>. Защитное действие образованных им плёнок после высыхания сохраняется не менее чем в течение 15 суток. При нахождении ингибирующего раствора в оборудовании защитный эффект сохраняется в течение неограниченного времени. Допускается многократное использование ингибирующего раствора. Гарантийный срок хранения 6 месяцев в таре изготовителя.

### **МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ**

Раствор ингибитора «КАРТЭК-28Б» в воде (в концентрации 4 л/м<sup>3</sup>) в процессе использования не оказывает вредного воздействия на организм человека и окружающую среду, является пожаро-взрывобезопасным. Концентрированный раствор ингибитора «КАРТЭК-28Б» имеет слабощелочную реакцию и при его попадании в глаза и на кожу их промывают водой.

### **ВАРИАНТЫ УПАКОВКИ И ПОСТАВКИ**

Ингибитор «КАРТЭК-28Б» поставляется на заказ в пластиковой таре ёмкостью 10-20 л.

### **НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ**

ТУ 2415-017-17804808-2005.





## **СЕРТИФИКАЦИЯ**

**Сертификаты,  
выданные Центральным НИИ коррозии и сертификации и ООО «КАРТЭК»  
в IV квартале 2022 г.**

Предприятие-изготовитель	Наименование продукции
<b>Сертификаты</b>	
ООО «ЮНАЙТЕД КЭПИТАЛ», г. Москва	Масла технологические ENOIL DRILL
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Модификатор реологии буровых растворов «GERTEKS-MR-36»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «BDF-985»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Реагент «GERTEKS-PN»
ООО «АРХИМ», г. Новозыбков	Добавка смазочная для буровых растворов на водной основе «AM-83»
ООО «Полимер-Л», Липецкая область, с. Хлевное	Муфты термоусаживающиеся «ПОЛИМЕР» по- лиэтиленовые и оцинкованные для изоляции стыков сварных соединений трубопроводов диаметром 63-1600 мм