

# ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

**Т. 29 № 1  
2024**

**THEORY AND PRACTICE OF CORROSION PROTECTION Vol.29. Iss.1**

**ЦНИИКС**



Центральный НИИ  
Коррозии и сертификации

Автономная некоммерческая организация

**“Центральный научно-исследовательский институт  
коррозии и сертификации”**

- ✓ **Испытания и сертификация продукции и материалов для топливно-энергетической, газовой, строительной, химической и других отраслей промышленности:**
  - санитарные разрешения;
  - сертификаты соответствия;
  - пожарные сертификаты;
  - паспорта экологической безопасности;
  - разработка и утверждение Планов ликвидации аварийных ситуаций;
  - разработка и регистрация ТУ;
  - проведение сертификационных испытаний
  - проведение испытаний, обследований, экспертиз с выдачей заключения.
- ✓ **Проведение исследовательских работ в области коррозии, электрохимии и материаловедения:**
  - автоклавные коррозионные и коррозионно-механические испытания и исследования материалов в водных и газовых средах ( $\text{CO}_2$ , Ar,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) при температурах до 320 °С и давлениях до 160 атм любой продолжительности;
  - количественное экспресс-определение коррозионных показателей металлов, сплавов, покрытий, конструкционных материалов в водных, технологических средах, грунтах и атмосфере, в лабораторных, производственных и натуральных условиях с использованием портативных высокочувствительных приборов и оригинальных методик;
  - определение коррозионности водно-органических охлаждающих жидкостей;
  - коррозионный мониторинг систем кондиционирования воздуха, тепло-водоснабжения в лабораторных и эксплуатационных условиях;
  - определение эффективности средств противокоррозионной защиты конструкционных материалов.
- ✓ **Услуги в области охраны интеллектуальной собственности и авторского права:**
  - регистрация товарных знаков;
  - регистрация промышленных образцов;
  - регистрация изобретений;
  - авторское право.
- ✓ **Разработка, выбор оптимальных технологий, поставка материалов для противокоррозионной защиты продукции машиностроения и производственных объектов:**
  - ингибиторов коррозии: летучих, для водных сред, кислотного травления, моющих, дезинфицирующих, пассивирующих составов, изолирующих покрытий, автоконсервантов, преобразователей ржавчины;
  - систем защитных лакокрасочных покрытий для металлоконструкций, находящихся в любом состоянии, при необходимости исключая абразивоструйную обработку путем использования ингибирующих грунтовок;
  - коррозионное обследование, производство противокоррозионных работ на промышленных объектах;
  - технологический аудит.

**АНО «ЦНИИКС»**

**Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 29 стр. 2**

**Тел.: 8-985-776-10-21**

**E-mail: [cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)**

**[www.cartec-com.ru](http://www.cartec-com.ru)**

## ИЛ «Топлива, масла, добавки»

Испытательная лаборатория «Топлива, масла, добавки» (ИЛ «ТМД», аттестат аккредитации ТЭК RU. 03 ЮЛ 22-Кор-023) создана совместно ФГУП «Институт горючих ископаемых» (ФГУП «ИГИ»), АНО «Центральный научно-исследовательский институт коррозии и сертификации» (АНО «ЦНИИКС») и Коррозионной Ассоциацией российского топливно-энергетического комплекса (ООО «КАРТЭК»).

Лаборатория проводит все виды испытаний, в том числе сертификационных, исследования, обследования, анализы масел, смазок, добавок и присадок, охлаждающих жидкостей, твердых и жидких полезных ископаемых, химпродуктов и оборудования, используемых для повышения нефтеотдачи пластов и в горнодобывающей промышленности. По результатам работ оформляются сертификаты, официальные протоколы и заключения.

Лабораторией также выполняются работы по целенаправленному улучшению потребительских и эксплуатационных свойств химпродуктов и оборудования, применяемых при добыче и транспортировке горючих полезных ископаемых.

+7 985-776-10-21

+7 916-233-96-59

e-mail: [cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)





*Уважаемые коллеги!*

*Наш журнал находится в процессе подготовки к сотрудничеству с общей базой данных и рефератов Scopus. В связи с этим несколько меняется оформление статей и журнала в целом. Кроме того, незначительные изменения коснутся и процедуры прохождения представляемых статей – от момента получения до момента публикации.*

*Все документы, которыми, в соответствии с нормативами базы Scopus, мы руководствуемся, размещены на сайте журнала. Кроме того, будут внесены коррективы (опять-таки незначительные) в Правила для авторов.*

*Хотим напомнить, что в настоящее время журнал «Практика противокоррозионной защиты» индексируется в базе CAS (CASSI). Эта информация может представлять интерес для соискателей ученых степеней и авторов.*

*Главный редактор А.П. Акользин.*



**ПРАКТИКА  
ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

**PRAKTIKA  
PROTIVOKORROZIONNOJ  
ZASITY**

Том 29 № 1 2024 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

Журнал публикует материалы по  
проблемам коррозионной защиты  
оборудования энергетики,  
промышленности, нефтегазодобычи;  
экологии; энергосбережения;  
прикладной электрохимии

После перехода в открытый доступ  
материалы журнала распространяются  
под лицензией CC BY (с марта 2025 г.)

**Учредитель**  
ООО «КАРТЭК»

**Редакция**  
ООО «КАРТЭК»

Зарегистрирован Комитетом  
Российской Федерации по печати

Свидетельство № 015777  
от 26.02.1997 г.

Адрес Учредителя и Редакции:  
РФ, 119071, г. Москва, Ленинский  
проспект, дом 29, стр. 2  
Почтовый адрес:  
РФ, 119071, г. Москва, а/я 64  
Тел. +7 (985) 776-10-21  
E-mail: [corrosion-protection@cartec-com.ru](mailto:corrosion-protection@cartec-com.ru),  
[cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)  
<http://www.corrosion-protection.ru>

© журнал «Практика  
противокоррозионной защиты», 2024

Отпечатано в ООО «Типография КоПринт», РФ,  
127411, г. Москва, шоссе Дмитровское, д.157, стр. 9  
Тираж 1000 экз  
Свободная цена

**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, Институт физической химии и  
электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Российская  
Федерация

**Абрашов Алексей Александрович**, кандидат технических  
наук, доцент, Российский химико-технологический  
университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская  
Федерация

**Алиев Тофиг Аббасали оглы**, доктор химических наук,  
профессор, член-корреспондент Национальной Академии  
Наук Азербайджана, Директор, Институт природных ресурсов  
Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,  
г. Нахчыван, Азербайджанская Республика

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

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

**Бугай Дмитрий Ефимович**, доктор технических наук,  
профессор, Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

**Вагапов Руслан Кизитович**, доктор технических наук,  
начальник лаборатории, Корпоративный научно-технический  
центр коррозионного мониторинга и защиты от коррозии  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация

**Гройсман Алик**, кандидат химических наук, преподаватель-  
консультант, Технион (Израильский технологический  
институт), г. Хайфа, Израиль

**Есенов Ермухамед Кудабиевич**, доктор технических наук,  
профессор, академик Казахской Национальной академии  
естественных наук, Южно-Казахстанский университет имени  
М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан

**Калужина Светлана Анатольевна**, доктор химических наук,  
профессор, Воронежский государственный университет,  
г. Воронеж, Российская Федерация

**Минеева Надежда Яковлевна**, доктор географических  
наук, профессор, Государственный университет по  
землеустройству, г. Москва, Российская Федерация

**Тимонин Виктор Алексеевич**, доктор химических наук,  
профессор, Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

**Фам Зуи Нам**, кандидат химических наук, Заместитель  
Генерального директора по науке, Российско-Вьетнамский  
Тропический научно-исследовательский и технологический  
центр (Тропический центр), г. Ханой, Вьетнам

**Заведующая редакцией**

**Акользина Алла Викторовна**, кандидат технических наук,  
ООО «КАРТЭК», г. Москва, Российская Федерация

**Выпускающий редактор**

**Наркевич Екатерина Николаевна**

**Технический редактор**

**Глухов Вячеслав Геннадьевич**



## THEORY AND PRACTICE OF CORROSION PROTECTION

### ПРАКТИКА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Volume 29 Issue 1 2024

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

4 issues per year  
Published 1996 – present

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

The magazine publishes materials on the problems of corrosion protection of equipment of industry, energy, oil and gas production; ecology; energy saving; applied electrochemistry

After transition to open access, the journal materials are distributed under a CC BY license (since March 2025)

**Founder**  
CARTEC, LLC

**Editorial Board**  
CARTEC, LLC

Registered by Press Committee of the Russian Federation

License No. 015777  
issued 26.02.1997

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

© “Theory and Practice of Corrosion Protection”, journal, 2024

Printed by CoPrint Printing House LLC, bld. 9, 157,  
Dmitrovskoe highway, Moscow, 127411, Russian Federation  
Circulation 1000 copies  
Free price

### 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

**Tofiq A. Aliyev**, Doctor of Chemistry, Professor, Corresponding  
Member of the National Academy of Sciences of Azerbaijan,  
Director of the Institute of Natural Resources of the Ministry of  
Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Nakhchivan,  
Republic of Azerbaijan

**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

**Dmitry E. Bugai**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa  
State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

**Ruslan K. Vagapov**, Doctor of Technical Sciences, Head of  
laboratory of the Corporate Scientific and Technical Center for  
Corrosion Monitoring and corrosion protection OOO Gazprom  
VNIIGAZ, Moscow, Russian Federation

**Alec Groysman**, Ph.D. in Chemistry, lecturer-consultant, Technion  
(Israel Institute of Technology), Haifa, Israel

**Ernuhamed K. Yesenov**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Academician of the Kazakhstan National Academy of Natural  
Sciences, South Kazakhstan University named after M. Auezov,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan

**Svetlana A. Kaluzhina**, Doctor of Chemistry, Professor, Voronezh  
State University, Voronezh, Russian Federation

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

**Viktor A. Timonin**, Doctor of Chemistry, Professor, 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,  
Moscow, Russian Federation

#### Copy Editor

**Ekaterina N. Narkevich**

#### Setting and Design

**Vyacheslav G. Glukhov**



**В номере:**

**ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ**

А.А. Петрушина, А.А. Абрашов, Н.С. Григорян, А.И. Хафизова, Н.А. Аснис,  
А.С. Касатикова, В.Д. Парфенова

Защитные и антиобледенительные супергидрофобные покрытия на  
алюминиевом сплаве АМг6..... 7

**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Т.Д. Гладких, А.Н. Маркин

Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков  
электрического сопротивления..... 20

П.А. Николайчук, П.А. Васильев, Ю.А. Енова

Ингибирующие свойства отвара Melissa officinalis  
против коррозии низкоуглеродистой стали в сернокислых средах..... 27

И.Н. Ганиев, М.М. Саидов, У.Н. Файзуллоев, Х.М. Ходжаназаров

Анодное поведение алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 типа дюралюмин,  
легированного празеодимом, в растворе NaCl..... 37

Л.Г. Князева, Н.А. Курьято, А.В. Дорохов, В.А. Брыксина

Масляные композиции с парафином и присадкой М-531 для защиты меди  
от атмосферной коррозии..... 46

**СЕРТИФИКАЦИЯ**..... 60

**ВНИМАНИЮ АВТОРОВ**

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

Редакция журнала не несет ответственность за  
достоверность информации рекламных материалов



**Contents:**

**SURFACE TREATMENT**

Anastasiya A. Petrushina, Aleksey A. Abrashov, Nelya S. Grigoryan,  
Alsu I. Hafizova, Naum A. Asnis, Alina S. Kasatikova, Viktorya D. Parfenova

Protective and Anti-icing Superhydrophobic Coatings on AA5056 Aluminum Alloy..... 7

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR CORROSION PROTECTION**

Tatiana D. Gladkih, Adrey N. Markin

Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained From Electrical  
Resistance Sensors..... 20

Pavel A. Nikolaychuk, Pavel A. Vasilyev, Yulia A. Enova

The Inhibitory Properties of Lemon Balm (*Melissa officinalis*) Boiling Extract on  
the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Medium..... 27

Izatullo N. Ganiev, Munavvarsho M. Saidov, Ubaidullo N. Faizulloev,  
Khairullo M. Khojanazarov

Anodic Behavior of Aluminum Alloy AM4.5Mg1 of the Duralumin Type, Alloyed  
with Praseodymium, in a NaCl Solution..... 37

Larisa G. Knyazeva, Nikolay A. Kur'yato, Andrey V. Dorokhov, Victoria A. Bryksina

Oil Compositions with Paraffin and Additive M-531 to Protect Copper from  
Atmospheric Corrosion..... 46

**SERTIFICATION**..... 60

**ATTENTION TO AUTHORS**

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

The editorial board of the journal is not responsible for the  
accuracy of the information of advertising materials



# Подписка на 2024 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 годовой подписки электронной версии журнала – 7200 рублей, в том числе НДС (20%).

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

## **ВНИМАНИЮ АВТОРОВ**

Журнал «Практика противокоррозионной защиты» входит в утвержденный ВАК Министерства науки и образования РФ перечень научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций по всей номенклатуре химических и химико-технологических специальностей, а также входит в международные базы данных Chemical Abstracts Service (CAS) и Ulrich's Periodicals Directory.



## **ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ**

Тип статьи: научная, оригинальная

## **SURFACE TREATMENT**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-1>

### **Защитные и антиобледенительные супергидрофобные покрытия на алюминиевом сплаве АМг6**

**А.А. Петрушина, А.А. Абрашов✉, Н.С. Григорян, А.И. Хафизова,  
Н.А. Аснис, А.С. Касатикова, В.Д. Парфенова**

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,  
РФ, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

*e-mail: [abrashov.a.a@muctr.ru](mailto:abrashov.a.a@muctr.ru)*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы нанесения супергидрофобных покрытий на поверхность металлов, металлических изделий и конструкций. Это актуально, например, для защиты от обледенения транспортных средств (самолеты, суда), линий электропередачи, зданий и сооружений различного назначения. В этих случаях супергидрофобные покрытия выполняют функцию льдофобных. Супергидрофобные покрытия также способствуют увеличению износостойкости металлоизделий.

В работе предложен способ увеличения износостойкости супергидрофобных покрытий за счет предварительного нанесения адгезионного подслоя из различных пассивирующих растворов.

В процессе работы было установлено, что наилучшей стойкостью к истиранию обладают супергидрофобные покрытия с Ti-Zr-содержащим подслоем. Результаты поляризационных измерений показали, что нанесение адгезионного подслоя также улучшает защитную способность супергидрофобных покрытий. Увеличение защитной способности также подтверждено экспозицией в камере соляного тумана. Время до появления первых признаков коррозии возросло со 140 до 430 ч.

В процессе работы сравнивались две методики для определения адгезии льда к алюминиевой поверхности. Первая методика была основана на параллельном «вырывании» стержня от массы льда. Вторая методика – на нормальном отрыве алюминиевого грибка из массы льда, находящегося в цилиндре.

Показано, что при отрыве льда от поверхности с идентичными покрытиями величины адгезии, полученные с помощью различных методик, отличаются: при нормальном отрыве величины адгезии всегда ниже. Очевидно, это происходит из-за того, что при нормальном отрыве определяется только адгезия льда к супергидрофобной поверхности, а при тангенциальном отрыве дополнительный вклад вносит механическое зацепление льда с выступами поверхности и увеличение силы давления льда на стержень, возникающее из-за расширения льда при замерзании воды. Более релевантным считается метод нормального отрыва.

**Ключевые слова:** супергидрофобные покрытия, износостойкость, адгезионные покрытия, подготовка поверхности, краевой угол смачивания, льдофобные покрытия, обледенение, защита от коррозии

**Для цитирования:** Петрушина А.А., Абрашов А.А., Григорян Н.С., Хафизова А.И., Аснис Н.А., Касатикова А.С., Парфенова В.Д. Защитные и антиобледенительные супергидрофобные покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 7-19. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-1>

*Получена 27.12.2023. Принята к публикации 31.01.2024. Опубликовано 01.03.2024.*

**Конфликт интересов.** Абрашов А.А. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2018 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

### **Protective and Anti-icing Superhydrophobic Coatings on AA5056 Aluminum Alloy**

**Anastasiya A. Petrushina, Aleksey A. Abrashov✉, Nelya S. Grigoryan,  
Alsu I. Hafizova, Naum A. Asnis, Alina S. Kasatikova, Viktorya D. Parfenova**

Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation

*e-mail: [abrashov.a.a@muctr.ru](mailto:abrashov.a.a@muctr.ru)*

**Abstract.** The issues of applying superhydrophobic coatings to the surface of metals, metal products and structures are considered. This is relevant, for example, for anti-icing protection of vehicles (airplanes, ships), power lines, buildings and structures for various purposes. In these cases, superhydrophobic coatings perform the function of ice-phobic coatings. Superhydrophobic coatings also help increase the wear resistance of metal products.

This work proposes a method for increasing the wear resistance of superhydrophobic coatings through the preliminary application of an adhesive sublayer using various passivating solutions.

Over the course of this work, it was found that superhydrophobic coatings with a Ti-Zr-containing sublayer have the highest abrasion resistance. The results of polarization measurements showed that the application of an adhesive sublayer also improves the protective ability of superhydrophobic coatings. The increase in protective ability was also confirmed by salt spray tests. The time until the appearance of the first signs of corrosion increased from 140 to 430 hours.

During the work, two techniques for determining the adhesion of ice to an aluminum surface were compared. The first technique was based on the parallel “tearing out” of a rod from the ice mass. The second technique is based on the perpendicular pulling of an aluminum disc out of the ice mass located in the cylinder.

It has been shown that when ice is detached from a surface with identical coatings, the adhesion values obtained using different methods differ: with normal detachment, the adhesion values are always lower. Obviously, this is due to the fact that during normal detachment, only the adhesion of ice to the superhydrophobic surface is determined, and during tangential separation, an additional contribution is made by the mechanical engagement of ice with surface protrusions and an increase in the force of ice pressure on the rod, resulting from the expansion of ice during freezing water. The normal tear-off method is considered more relevant.

**Keywords:** superhydrophobic coatings, wear resistance, adhesive coatings, surface treatment, contact angle, ice-phobic coatings, icing, corrosion protection

**For citation:** Petrushina, A. A., Abrashov, A. A., Grigoryan, N. S., Hafizova, A. I., Asnis, N. A., Kasatikova, A. S. & Parfenova, V. D. (2024). Protective and Anti-icing Superhydrophobic Coatings on AA5056 Aluminum Alloy. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 7-19. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-1>

*Received December 27, 2023. Accepted for publication January 31, 2024. Published March 01, 2024.*

**Conflict of interest.** Abrashov A.A. has been a member of the editorial board of the journal “Theory and Practice of Corrosion Protection” since 2018, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal’s peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

## Введение

Актуальной проблемой, встречающейся во многих отраслях народного хозяйства, в настоящее время является обледенение. Наиболее часто от обледенения страдают транспортные средства. В первую очередь речь идет о самолетах, большая часть элементов которых выполнена из сплавов алюминия. Образование наледи сильно влияет на аэродинамику воздушных судов и может иметь серьезные последствия [1, 2]. Наледообразование также негативно сказывается на остойчивости кораблей и судов, повреждает оснастку, уменьшает запас их плавучести, а также представляет опасность для личного состава при падении льда с мачт. При значительных масштабах обледенение может придать судну чрезмерный дифферент на какую-либо оконечность и крен на какой-либо борт.

Серьезной проблемой при транспортировке электроэнергии является нарастание льда на конструктивных элементах линий электропередач (ЛЭП), что представляет со-

бой большую опасность для их нормальной эксплуатации. Налипание снега может привести к увеличению статических и динамических нагрузок на провода, опоры и линейную арматуру ЛЭП [3], что может повлечь за собой аварийное отключение ЛЭП.

Одним из действенных способов борьбы с обледенением является обколка льда. Данный способ может быть применен к ЛЭП или кромкам льда на жилых зданиях, но совсем не подходит для транспортных средств.

Наиболее повышенный интерес в настоящее время вызывает решение проблемы снижения обледенения с использованием льдофобных покрытий. Одними из наиболее перспективных направлений в создании противообледенительных поверхностей являются получение на поверхности защищаемых материалов супергидрофобных покрытий [3-13]. Преимуществами такого подхода являются, во-первых, водоотталкивающие свойства супергидрофобной поверхности, минимизирующие накопление на поверхности воды, которая может кристал-

лизоваться. Во-вторых, для льдофобных поверхностей характерна низкая прочность сцепления уже образовавшегося льда, что позволяет льду или инею самопроизвольно удаляться под действием собственной массы или ветровой нагрузки.

В настоящей работе исследована возможность получения супергидрофобного покрытия с повышенной износостойкостью на поверхности алюминиевого сплава АМгб, а также исследование антиобледенительных свойств формирующихся покрытий.

### Методики экспериментов

В качестве обрабатываемого металла использован сплав алюминия марки АМгб состава (в %):  $Al - 91,1...93,68$ ;  $Mg - 5,8...6,8$ ;  $Mn - 0,5...0,8$ . Обезжиривание образцов размерами  $30 \times 40 \times 1$  мм проводили в растворе, содержащем (г/л):  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O - 22$ ;  $Na_2CO_3 - 25$ ;  $NaOH - 7,5$ ;  $Na_2SiO_3 - 10$ ; ДС-10 - 4 при  $60...70$  °С в течение 10 мин [14]. Для травления поверхности сплава использовали 10% раствор  $NaOH$  в течение 30 с при температуре  $70$  °С [14, 15]. В качестве гидрофобизирующего агента была использована стеариновая кислота. Для растворения стеариновой кислоты использована бинарная система, полученная смешением заданных количеств диметилсульфоксида (ДМСО) и дистиллированной воды. После гидрофобизации образцы подвергали сушке при температуре  $80$  °С в течение 10 мин.

Для ускоренной оценки защитной способности (ЗСА) покрытий использовали экспресс метод капли с применением раствора Акимова, содержащего:  $CuSO_4 \cdot 5H_2O - 82$  г/л,  $NaCl - 33$  г/л,  $0,1$   $HCl - 13$  мл/л. ЗСА покрытий по данному методу оценивается как время (в секундах) до изменения цвета поверхности под каплей от серого до черного [14].

Краевой угол смачивания воды при контакте с алюминиевыми пластинами определяли на приборе KRUSS DSA25 (Германия). При работе на гониометре при помощи фотокамеры были получены фотографии капель, а затем рассчитан краевой угол при помощи программного обеспечения. Каплю воды объемом  $2...5$  мкл наносили на поверхность образцов и краевой угол определяли путем измерения наклона касательной

к капле на границе жидкость/твердое тело. На данном гониометре определялся и угол скатывания капли.

Коррозионные испытания производили в камере соляного тумана Ascott S450iP (Великобритания) в соответствии со стандартом ASTM B117. В качестве солевого раствора использовали 5%  $NaCl$  ( $pH$   $6,5...7,2$ ), который распыляли внутри камеры с испытуемыми образцами. Температура в камере составляла  $35$  °С, а влажность  $95...100\%$ . Осмотр образцов производили 3 раза в сутки для фиксации появления первых очагов коррозии.

Стойкость супергидрофобных покрытий к истиранию исследовалась на модернизированном ротационном абразиметре Taber Elcometer 5135. Плоские образцы с покрытиями крепились к рычагам установки и при одинаковом удельном давлении на оба рычага ( $3,5$  Н/см<sup>2</sup>) прижимались к фетровому диску. Длина окружности диска на уровне закрепления образцов составляла  $31,4$  см. Истирание образцов осуществлялось при вращении фетрового диска со скоростью вращения  $60$  об/мин. Параллельность образца плоскости фетрового диска достигалась автоматически, поскольку образец приклеивали путем прижимания к нему нагрузочного рычага, при этом образец заранее размещали на поверхности фетрового диска. Стойкость образцов к истиранию оценивалась по количеству циклов до появления первых заметных глазу признаков истирания. Краевой угол смачивания и защитную способность после истирания измеряли в нескольких точках, погрешность измерения для угла смачивания составляла  $\pm 1^\circ$ , защитной способности  $\pm 2$  с.

Поляризационные измерения проводили при помощи потенциостата Autolab PGT302N в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала  $0,5$  мВ/с. В качестве рабочих электродов использовали алюминиевые образцы с разрабатываемыми покрытиями. Электродные потенциалы измеряли относительно хлоридсеребряного электрода, а их значения пересчитывали в нормальную водородную шкалу.

Для определения значений коррозионного потенциала  $E_{кор}$  и плотности коррозионного тока  $i_{кор}$  использовали метод тафе-

левой экстраполяции [16, 17]. Значения  $E_{кор}$  и  $i_{кор}$  определяли координатами точек пересечения экстраполированных анодных и катодных тафельских участков вольтамперограмм.

Адгезия льда к алюминиевой поверхности оценивалась двумя способами с помощью специальных методик. Согласно первой методике, стержень параллельно своей оси «вырывался» из массы льда. В цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 36 мм заливали 32 мл водопроводной воды (рис. 1а), затем в нее помещали алюминиевый стержень ( $d = 14$  мм) на глубину 17 мм (рис. 1б). Устройство помещали в лабораторный морозильник Arctico и выдерживали в течение 1,5 ч при температуре минус  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$  (рис. 1с). После этого устройство вынимали из морозильной камеры, закрепляли в зажимах разрывной машины и определяли усилие ( $P$ ), вектор которого параллелен оси стержня. Значение адгезион-

ной прочности измеренное этим методом,  $f$  ( $\text{H}/\text{мм}^2 = \text{МПа}$ ) вычисляли по формуле:

$$f = F / (2\pi r l + \pi r^2),$$

где  $F$  – усилие вырывания стержня, Н;

$r$  – радиус стержня, мм;

$l$  – длина стержня, находящегося в контакте со льдом, мм.

Согласно второй методике алюминиевый грибок отрывался по нормали от поверхности льда в цилиндре. В цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 36 мм заливали 32 мл водопроводной воды (рис. 2а), затем в нее погружали на 0,5...1 мм алюминиевый грибок ( $d = 20$  мм). Устройство помещали в лабораторный морозильник Arctico и выдерживали в течение 1,5 ч при температуре минус  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$  (рис. 2б).

После этого устройство вынимали из морозильника, закрепляли в зажиме портативного автоматического адгезиометра PosiTest AT-A определяли усилие  $f$  ( $\text{H}/\text{мм}^2 = \text{МПа}$ ), при котором грибок «отрывался» от поверхности льда по нормали.

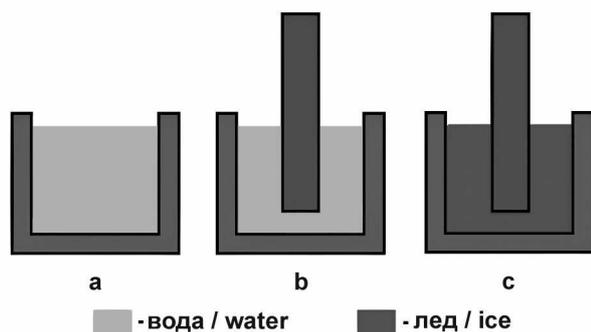


Рис. 1. Приспособление для параллельного определения адгезионной прочности льда

Fig. 1. Device for parallel measurement of the adhesive strength of ice

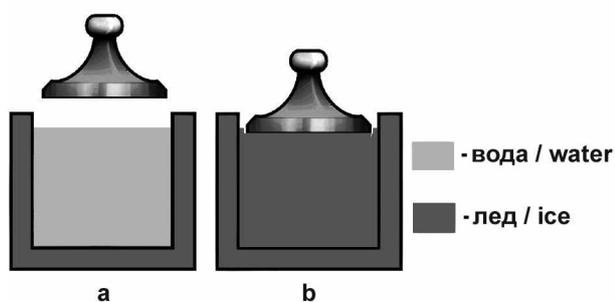


Рис. 2. Приспособление для нормального определения адгезионной прочности льда

Fig. 2. Device for normal measurement of the adhesive strength of ice

### Результаты и их обсуждение

Процесс придания поверхности супергидрофобности, как правило, осуществляется в две стадии: первая – создание на поверхности микрошероховатой структуры, вторая – модифицирование созданной микрошероховатой поверхности за счет адсорбции соединений, содержащих длинные алкильные цепи, характеризующихся низкой поверхностной энергией.

В качестве базовой композиции был выбран раствор, содержащий ДМСО и воду в соотношении 7:1, в который вводили стеариновую кислоту в количестве 3 г/л, позволяющий формировать при  $t = 30^\circ\text{C}$  и  $\tau = 10$  мин на поверхности сплава супергидрофобные покрытия (СГП) с краевым углом смачивания  $160^\circ$  [19, 20].

При обработке поверхности сплава АМгб на воздухе раствором стеариновой кислоты в бинарной системе растворителей ДМСО/ $H_2O$  можно предполагать образование на поверхности преимущественно стеарата алюминия, за счет чего достигается эффект гидрофобизации [19, 20].

Известным недостатком супергидрофобных покрытий, полученных хими-

ческим способом, является их низкая износостойкость. В настоящей работе исследована возможность повышения износостойкости СГП за счет предварительного нанесения адгезионного покрытия из растворов, составы которых приведены в *табл. 1* [14, 21].

Установлено, что наибольшим краевым углом смачивания ( $168^\circ$ ) и наилучшей защитной способностью (68 с) обладают супергидрофобные покрытия с предварительно нанесенным титан-цирконийсодержащим адгезионным подслоем (*табл. 2*).

Параметром гидрофобного покрытия, определяющим его способность к самоочищению, является угол соскальзывания капли воды с его поверхности. При высоком значении угла скатывания капли будет затруднена самоочистка поверхности и снизится коррозионная стойкость покрытия.

Все исследуемые покрытия обладают необходимым углом скатывания менее  $10^\circ$ . Для СГП данное значение равно  $7^\circ$ , а для СГП с Ti-Zr-содержащим подслоем удалось добиться угла скатывания  $4^\circ$ .

Исследована износостойкость форми-

рующихся супергидрофобных покрытий в сочетании с различными адгезионными подслоями. Критериями оценивания служили значения краевого угла смачивания и защитная способность после испытания на истираемость. Как и следовало ожидать, большей износостойкостью обладают супергидрофобные покрытия с адгезионным Ti, Zr-содержащим подслоем (*рис. 3*). Покрытие перестает быть супергидрофобным через 180 циклов истирания. Следует обратить внимание, что супергидрофобное покрытие без адгезионного подслоя теряет супергидрофобность уже через 15 циклов истирания. Установлено, что супергидрофобное покрытие на поверхности без адгезионного подслоя стирается практически полностью через 200 циклов истирания (ЗСА снижается с 35 до 10 с), при этом супергидрофобное покрытие с Ti, Zr-содержащим адгезионным подслоем стирается лишь через 800 циклов истирания (ЗСА снижается с 68 до 20 с).

Коррозионные испытания образцов алюминиевого сплава АМг6 с гидрофобным покрытием без адгезионного

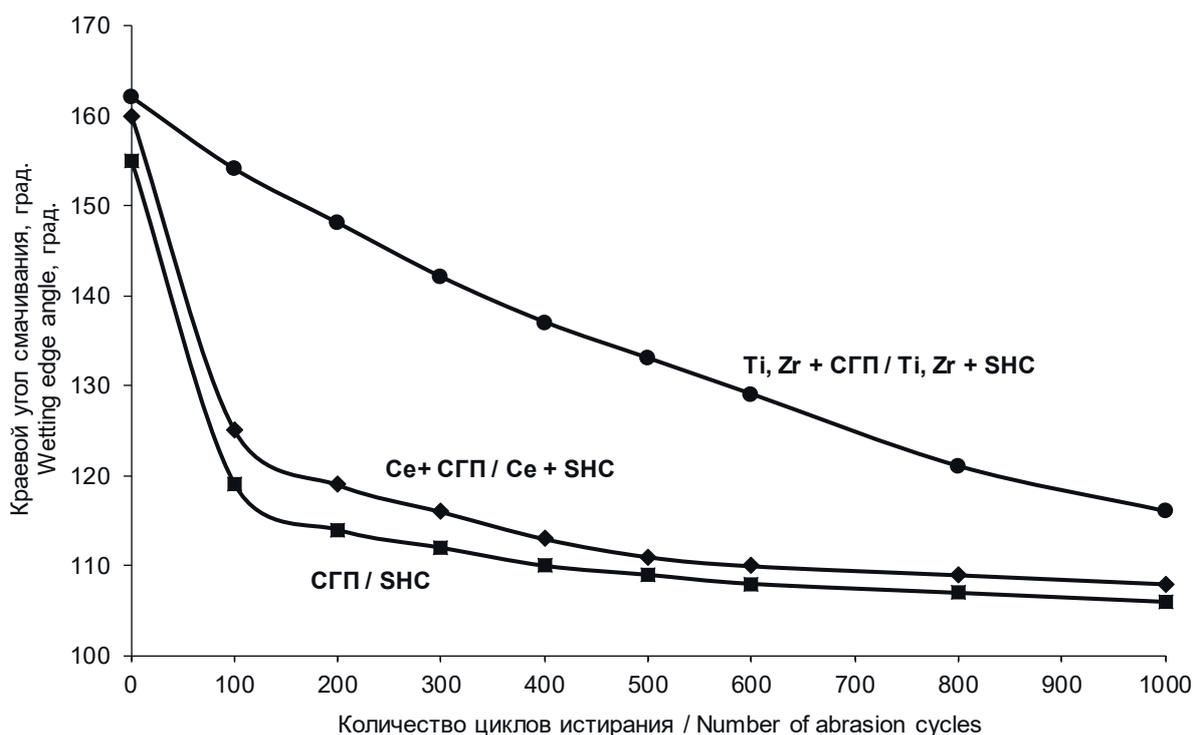
**Таблица 1. Состав рабочего раствора и параметры процесса**  
**Table 1. Composition of the working solution and process parameters**

Компонент / Component	Концентрация / Concentration	
	1	2
$Ce(NO_3)_3$	2 г/л	1 г/л
$H_2O_2$	20 мл/л	-
$H_2TiF_6$	-	1,2 г/л
$H_2ZrF_6$	-	1,2 г/л
Параметры процесса / Process parameters		
<i>pH</i>	2,0...3,0	4,0...5,0
Продолжительность обработки, мин / Processing time, min	2	2
<i>t</i> , °C	20...25	20...25
<i>t</i> температура сушки, °C / drying temperature, °C	80	80

**Таблица 2. Краевой угол смачивания и защитная способность супергидрофобных покрытий на поверхностях с различными адгезионными подслоями**

**Table 2. Contact angle and protective ability of superhydrophobic coatings on surfaces with various adhesive sublayers**

Вид адгезионного покрытия / Type of adhesive coating	Краевой угол смачивания, ° / Wetting edge angle, °	ЗСА, с / Protective ability, sec	Угол скатывания, ° / Rolling angle, °
Без адгезионного подслоя / Without adhesive sublayer	157	35	7
Ce-содержащее / Ce-containing	160	46	7
Ti, Zr-содержащее / Ti, Zr-containing	168	68	4



**Рис. 3. Результаты испытаний на стойкость к истиранию**

**Fig. 3. Abrasion resistance test results**

подслоя в камере соляного тумана показали, что СГП выдерживает 140 ч в условиях соляного тумана (5% NaCl) до появления первых очагов коррозии основы, а естественная оксидная пленка начинает корродировать через 24 ч. Защитная

способность СГП с адгезионным *Ti-Zr*-содержащем подслоем увеличивается при экспозиции в камере соляного тумана со 140 до 430 ч.

Было исследовано изменение краевого угла смачивания поверхности гидро-

фобизированных образцов в зависимости от продолжительности их пребывания в камере соляного тумана. Установлено, что после 80 ч экспозиции образцов в камере соляного тумана поверхность сохраняет гидрофобные свойства ( $130^\circ$ ), а после 110 ч краевой угол смачивания снижается до  $70...90^\circ$ , что указывает на деградацию защитного покрытия.

С помощью электрохимических исследований была определена скорость коррозии, построены диаграммы коррозии (табл. 3). Установлено, что наименьшей скоростью коррозии обладают супергидрофобные покрытия с Ti, Zr-содержащим подслоем.

Сравнение токов коррозии сплава АМгб с супергидрофобным покрытием показывает, что предварительное осаждение адгезионного подслоя приводит к снижению скорости коррозии сплава АМгб, токи коррозии равны  $3,51 \cdot 10^{-7}$  (церийсодержащий адгезионный подслон) и  $1,92 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> (титан-цирконий-содержащий адгезионный подслон) соответственно. Следует обратить внимание, что скорость коррозии алюминиевого сплава с супергидрофобным покрытием без адгезионного подслоя составляет  $2,35 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>.

В настоящей работе изучена прочность сцепления льда с гидрофобизированной поверхностью. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Как и следовало ожидать, адгезия льда к супергидрофобной поверхности уменьша-

ется. Следует обратить внимание, что значение усилия нормального отрыва во всех случаях ниже, чем значение усилия параллельного отрыва.

Эксперименты показали, что антиобледенительные свойства ухудшались с увеличением количества циклов «обледенение – отрыв» (рис. 4). Верхняя часть микроступов, погруженная в пленку воды, разрушается при её замерзании.

На рис. 5 показаны зависимости силы адгезии льда к алюминиевой поверхности с супергидрофобным покрытием от количества циклов заморозки воды на поверхности покрытия.

Установлено, что независимо от природы супергидрофобного покрытия, по мере увеличения циклов «заморозка-отрыв» прочность сцепления льда с поверхностью увеличивается.

Как видно из рис. 5, при отрыве льда от поверхности с идентичными покрытиями величины адгезии, полученные с помощью различных методик, отличаются: при нормальном отрыве значения адгезии всегда ниже. Очевидно, что это является следствием того, что при нормальном отрыве определяется только величина адгезии льда к супергидрофобной поверхности, а при тангенциальном отрыве дополнительный вклад в величину адгезии вносит механическое зацепление льда с выступами поверхности и увеличение силы

Таблица 3. Электрохимические показатели коррозии

Table 3. Electrochemical corrosion indicators

Вид покрытия / Type of coating	$E_{cor}$ , В (с.в.э.) / $E_{cor}$ , V (SHE)	$i_{cor}$ , А/см <sup>2</sup> / $i_{cor}$ , А/см <sup>2</sup>
АМгб без покрытия / AA5056 without coating	-0,702	$8,74 \cdot 10^{-5}$
Супергидрофобное покрытие / Superhydrophobic coating	-0,418	$2,35 \cdot 10^{-6}$
Ce-содержащее покрытие + супергидрофобное покрытие / Ce-containing coating + superhydrophobic coating	-0,471	$3,51 \cdot 10^{-7}$
Ti, Zr-содержащее покрытие + супергидрофобное покрытие / Ti, Zr-containing coating + superhydrophobic coating	-0,401	$1,92 \cdot 10^{-7}$

Таблица 4. Прочность сцепления льда с алюминиевой поверхностью, Н/мм<sup>2</sup>  
Table 4. Adhesion strength of ice to aluminium surface, N/mm<sup>2</sup>

Вид покрытия / Type of coating	Параллельный отрыв / Parallel separation	Нормальный отрыв / Normal separation
АМг6 без покрытия / AA5056 without coating	1,12	0,465
Супергидрофобное покрытие / Superhydrophobic coating	0,3	0,14
Ce-содержащее покрытие + супергидрофобное покрытие / Ce-containing coating + superhydrophobic coating	0,53	0,32
Ti, Zr-содержащее покрытие + супергидрофобное покрытие / Ti, Zr-containing coating + superhydrophobic coating	0,44	0,2

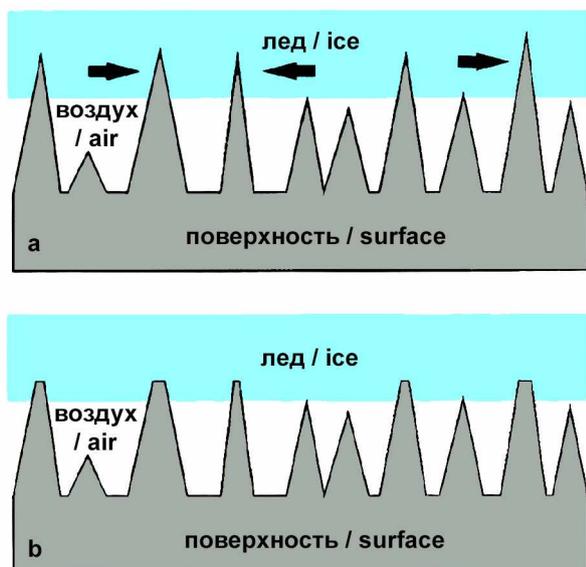


Рис. 4. Изображение льда на шероховатой поверхности (а – поверхность покрытия во время 1 цикла заморозания, б – та же поверхность при последующих циклах «заморозка – отрыв»)

Fig. 4. Image of ice on a rough surface (a – coating surface during 1 freezing cycle, b – the same surface after subsequent freeze cycles – separation)

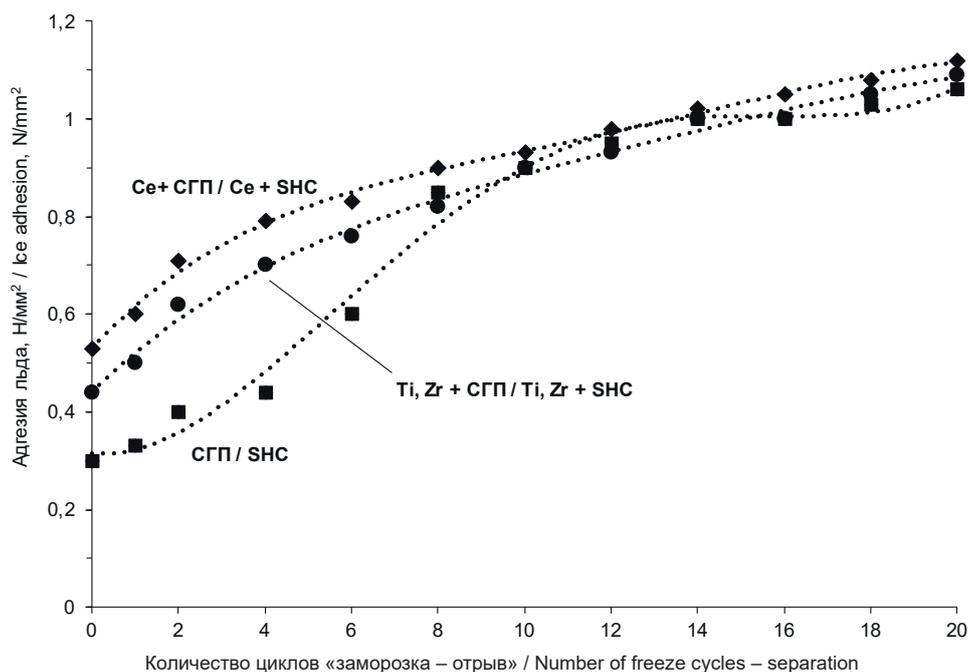
давления льда на поверхность стержня, возникающая из-за расширения льда при заморозании воды. Следовательно, более релевантным является метод нормального отрыва.

Показано, что с увеличением количества циклов «заморозка – отрыв» постепенно снижаются краевой угол смачивания и защитная способность (рис. 6). Установлено, что краевой угол смачивания супергидрофобного покрытия с адгезионным подслоем снижается ниже 150° через 6 циклов «заморозка – отрыв» и поверхность теряет свою супергидрофобность. Стоит обратить внимание, что без адгезионного подслоя покрытие перестает

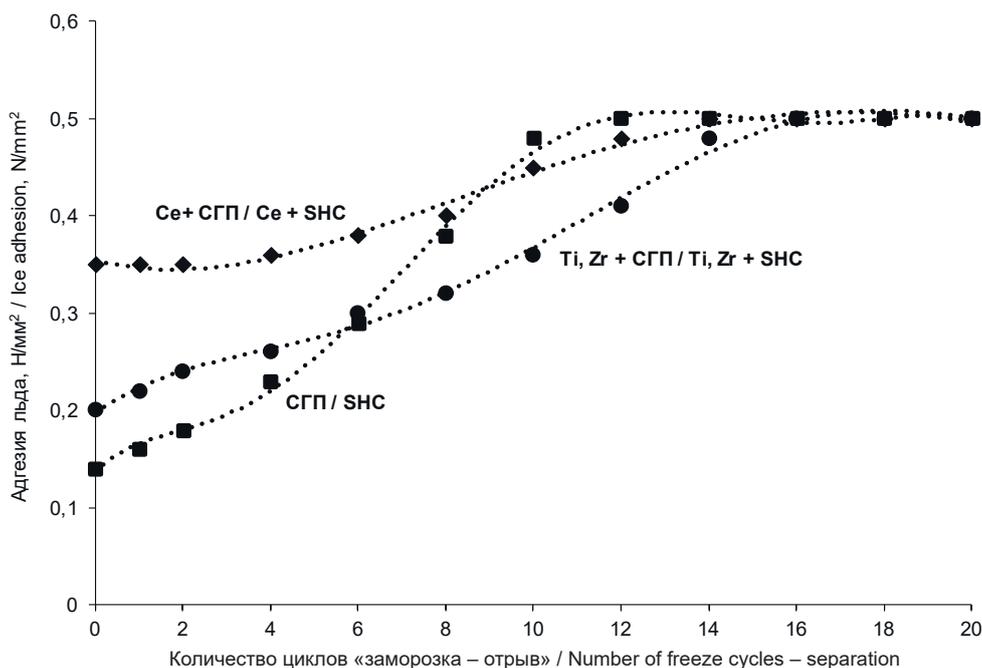
быть супергидрофобным уже после 2 цикла «заморозка - отрыв».

Показано, что защитная способность исследуемых покрытий с *Ti*, *Zr*- и *Ce*-содержащим подслоем через 20 циклов снижается до 40 с. При этом ЗСА обычного супергидрофобного покрытия уже через 8 циклов снижается практически до нуля, что может свидетельствовать о полном снятии защитного слоя.

С учетом полученных результатов, разработанная технология может быть использована для получения на поверхности алюминиевых сплавов типа АМг6 супергидрофобных покрытий, обладающих влагозащитными и антиобледенительными свойствами, и может быть использована для защиты от гололедно-изморозевых отложений и сопутствующей коррозии строитель-



a



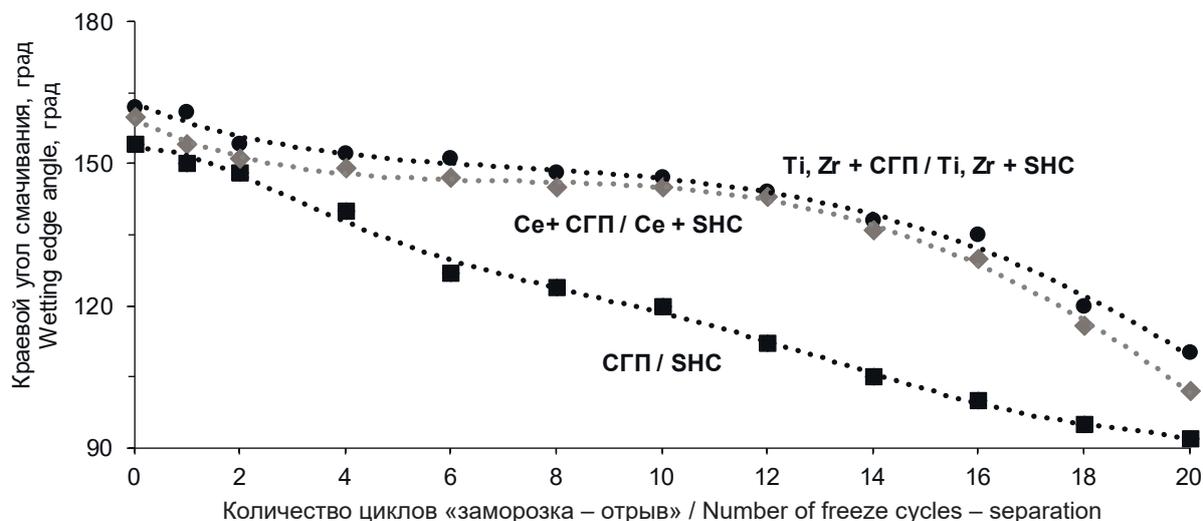
b

Рис. 5. Зависимость адгезии льда к супергидрофобной поверхности от количества циклов «заморозка – отрыв»:

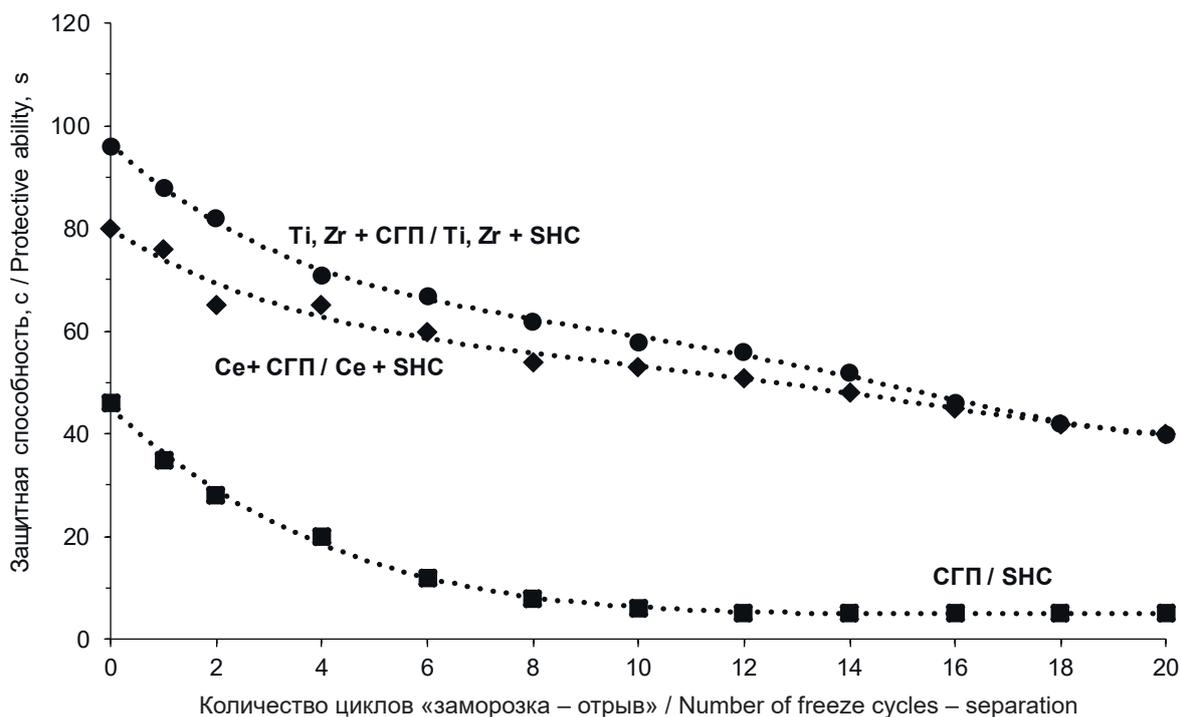
- a – параллельное «вырывание» стержня из массы льда;
- b – нормальное «отрывание» грибка с поверхности льда

Fig. 5. Dependence of the adhesion of ice to a superhydrophobic surface on the number of freeze cycles-separation:

- a – parallel “tearing out” of the rod from the mass of ice;
- b – normal «tearing off» of the cylinder from the surface of the ice



a



b

Рис. 6. Зависимость краевого угла смачивания (а) и защитной способности (б) от количества циклов «заморозка – отрыв», нормальное «отрывание» грибка с поверхности льда

Fig. 6. Dependence of the contact angle (a) and the protective ability (b) on the number of freeze cycles – separation, normal “tearing off” of the cylinder from the surface of the ice

ных конструкций (каркасов зданий, ферм, оконных рам, лестниц и др.) и сооружений энергетики, транспорта, в т.ч. авиатранспорта, и др.

### Выводы

1. В результате выполненной работы была разработана технология нанесения СГП с использованием адгезионного подслоя, позволяющая формировать покрытия с повышенной износостойкостью.

2. Установлено, что нанесение *Ti*, *Zr*-содержащего адгезионного подслоя, способствует повышению устойчивости к истиранию, 800 циклов вместо имеющихся ранее 200, и коррозионной стойкости при экспозиции в камере соляного тумана со 140 до 430 ч.

3. Разработана методика количественной оценки антиобледенительных свойств формирующихся покрытий, основанная на нормальном отрыве алюминиевого грибка с поверхности льда.

### Литература

1. Peng C., Chen Z., Tiwari M.K. All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance // *Nature Mater.* – 2018. – V. 17, № 4. – P. 355-360. <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0044-2>

2. Blossey R. Self-cleaning surfaces – virtual realities // *Nature Mater.* – 2003. – V. 2, № 6. – P. 301-306. doi: 10.1038/nmat856

3. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Методы борьбы с обледенением ЛЭП: перспективы и преимущества новых супергидрофобных покрытий // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – № 6. – С. 39-47.

4. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nanofluorocarbon coating on icing // *Applied Surface Science.* – 2012. – V. 258. – P. 7219-7224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.043>

5. Farhadi S., Farzaneh M., Kulinich S.A. Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces // *Applied Surface Science.* – 2011. – V. 257. – P. 6264-6269. doi:10.1016/j.apsusc.2011.02.057

6. Antonini C., Innocenti M., Horn T., Marengo M., Amirfazliet A. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy

reduction in anti-icing systems // *Cold Regions Science and Technology.* – 2011. – V. 67. – P. 58-67. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.02.006

7. Saleema N., Farzaneh M., Paynter R., Sarkar D. Prevention of Ice Accretion on Aluminum Surfaces by Enhancing Their Hydrophobic Properties // *Journal of Adhesion Science and Technology.* – 2011. – V. 25. – P. 27-40. doi:10.1163/016942410X508064

8. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: Принципы создания, свойства и применение // *Успехи химии.* – 2008. – Т. 77, № 7. – С. 619-638.

9. Lin Y., Chen H., Wang G., Liu A. Recent progress in preparation and anti-icing applications of superhydrophobic coatings // *Coatings.* – 2018. – V. 8. – P. 208. doi:10.3390/coatings8060208

10. Ozbay S., Yuceel C., Erbil H.Y. Improved icephobic properties on surfaces with a hydrophilic self-lubricating liquid // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2015. – V. 7. – P. 22067-22077. doi:10.1021/acsami.5b07265

11. Khedir K.R., Kannarpady G.K., Ryerson C., Birisa A.S. An outlook on tunable superhydrophobic nanostructural surfaces and their possible impact on ice mitigation // *Progress in Organic Coatings.* – 2017. – V. 112. – P. 304-318. doi: 10.1016/j.porgcoat.2017.05.019

12. Глухов В.Г., Ботрякова И.Г., Поляков Н.А. Влияние стеариновой кислоты и 1-додекантиола на супергидрофобные свойства электрохимических медных покрытий, полученных в условиях диффузионных ограничений // *Практика противокоррозионной защиты.* – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 34-47. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.109.3-4

13. Цыганкова Л.Е., Урядников А.А., Дорохов А.В., Шель Н.В., Дорохова А.Н., Курьято Н.А. Защитные свойства супергидрофобных покрытий на меди и стали, полученных электрохимическим методом // *Практика противокоррозионной защиты.* – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 7-16. doi: 10.31615/j.corros.prot.2021.99.1-1

14. Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A., Simonova M.A., Miroshnikov V.S., Arkhipushkin I.A. Surface passivation of 5556 aluminum alloy in solutions based on cerium nitrate // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* – 2021. – V. 10. – P. 132-144.



doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-8

15. Zang D., Zhu R., Zhang W., Wu J., Yu X., Zhang Y. Stearic acid modified aluminum surfaces with controlled wetting properties and corrosion resistance // *Corrosion Science*. – 2014. – V. 83. – P. 86-93. doi: 10.1016/j.corsci.2014.02.003

16. Шалдаев В.С., Малофеева А.Н., Давыдов А.Д. Определение скорости коррозии молибдена, рения и их сплавов в растворе хлорида натрия методом тафелевской экстраполяции // *Электрохимия*. – 2014. – Т. 50, № 10. – С. 1106-1110.

17. McCafferty E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method // *Corrosion Science*. – 2005. – V. 47. – P. 3202-3215, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.046>

18. Abrashov A.A., Khafizova A.I., Grigoryan N.S., Petrushina A.A., Asnis N.A., Chudnova T.A. Protective superhydrophobic coatings on the surface of anodized aluminum // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. – 2023. – V. 12, № 3. – P. 1013-1027. doi: 10.17675/2305-6894-2023-12-3-13

19. Абрашов А.А., Григорян Н.С., Толмачев Я.В., Серов А.Н. Экологически безопасный раствор гидрофобизации сплава АМг6 на основе стеариновой кислоты и диметилсульфоксида // *Цветные металлы*. – 2021. – № 10. – С. 37-42. doi:10.17580/tsm.2021.10.05

20. Abrashov, A., Grigoryan, N., Korshak, Y., Vagramyan, T., Grafov, O., Mezhuev, Y. Regularities of the Formation of a Green Superhydrophobic Protective Coating on an Aluminum Alloy after Surface Modification with Stearic Acid Solutions // *Metals*. – 2021. – V. 11. – P. 1718. <https://doi.org/10.3390/met11111718>

21. Abrashov A., Grigoryan N., Vagramyan T., Asnis N. On the Mechanism of Formation of Conversion Titanium-Containing Coatings // *Coatings*. – 2020. – V. 10, No 4. – 328 (P. 1-11). doi:10.3390/coatings10040328

### References

1. Peng, C., Chen, Z., Tiwar, I M. K. (2018). All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance. *Nature Mater*, 17(4), 355-360. <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0044-2>

2. Blossey, R. (2003). Self-cleaning

surfaces – virtual realities. *Nature Mater*, 2(6), 301-306. doi:10.1038/nmat856

3. Bojnovich, L. B., Emel'yanenko, A. M. (2011). Methods of combating icing of power lines: prospects and advantages of new superhydrophobic coatings. *ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, 6, 39-47. (in Russ.)

4. Wang, H., He, G., Tian, Q. (2012). Effects of nano-fluorocarbon coating on icing. *Applied Surface Science*, 258, 7219-7224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.043>

5. Farhadi, S., Farzaneh, M., & Kulinich, S. A. (2011). Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces. *Applied Surface Science*, 257, 6264-6269. doi:10.1016/j.apsusc.2011.02.057

6. Antonini, C., Innocenti, M., Horn, T., Marengo, M., & Amirfazliet, A. (2011). Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems. *Cold Regions Science and Technology*, 67, 58-67. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.02.006

7. Saleema, N., Farzaneh, M., Paynter, R., & Sarkar, D. (2011). Prevention of Ice Accretion on Aluminum Surfaces by Enhancing Their Hydrophobic Properties. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25, 27-40. doi:10.1163/016942410X508064

8. Bojnovich, L. B., Emel'yanenko, A. M. (2008). Hydrophobic materials and coatings: Principles of design, properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 77, 583-600. (in Russ.)

9. Lin, Y., Chen, H., Wang, G., & Liu, A. (2018). Recent progress in preparation and anti-icing applications of superhydrophobic coatings. *Coatings*, 8, 208. doi:10.3390/coatings8060208

10. Ozbay, S., Yuceel, C., & Erbil, H. Y. (2015). Improved icephobic properties on surfaces with a hydrophilic self-lubricating liquid. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, 22067-22077. doi:10.1021/acsami.5b07265

11. Khedir, K. R., Kannarpady, G. K., Ryerson, C., & Birisa, A. S. (2017). An outlook on tunable superhydrophobic nanostructural surfaces and their possible impact on ice mitigation. *Progress in Organic Coatings*, 112, 304-318. doi:10.1016/j.porgcoat.2017.05.019

12. Glukhov, V. G., Botryakova, I. G., &



Polyakov, N. A. (2023). Effect of stearic acid and 1-dodecanethiol on the superhydrophobic properties of electrochemical copper coatings obtained under diffusion limitations. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28(3), 34-47. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.109.3-4 (in Russ.)

13. Tsygankova, I. E., Uryadnikov, A. A., Dorokhov, A. V., Shel, N. V., Dorokhova, A. N. & Kur'yato, N. A. (2021). Protective properties of superhydrophobic coatings on copper and steel obtained by electrochemical method. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 26(1), 7-16. doi:10.31615/j.corros.prot.2021.99.1-1 (in Russ.)

14. Abrashov, A. A., Grigoryan, N. S., Vagramyan, T. A., Simonova, M. A., Miroshnikov, V. S. & Arkhipushkin, I. A. (2021). Surface passivation of 5556 aluminum alloy in solutions based on cerium nitrate. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10, 132-144. doi:10.17675/2305-6894-2021-10-1-8

15. Zang, D., Zhu, R., Zhang, W., Wu, J., Yu, X. & Zhang, Y. (2014). Stearic acid modified aluminum surfaces with controlled wetting properties and corrosion resistance. *Corrosion Science*, 83, 86-93. doi:10.1016/j.corros.2014.02.003

16. Shaldaev, V. S., Malofeeva, A. N. & Davydov, A. D. (2014). Determination of corrosion rate of molybdenum, rhenium and their alloys in sodium chloride solution by the method of tafel extrapolation. *Russian Journal of*

*Electrochemistry*, 50(10), 1106-1110. (in Russ.)

17. McCafferty E. (2005). Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method. *Corrosion Science*, 47, 3202-3215. <https://doi.org/10.1016/j.corros.2005.05.046>

18. Abrashov, A. A., Khafizova, A. I., Grigoryan, N. S., Petrushina, A. A., Asnis, N. A. & Chudnova, T. A. (2023). Protective superhydrophobic coatings on the surface of anodized aluminum. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 12(3), 1013-1027. doi:10.17675/2305-6894-2023-12-3-13

19. Abrashov, A. A., Grigoryan, N. S., Tolmachev, Y. V. & Serov, A. N. (2021). Environmentally friendly solution of hydrophobization of the 5556 alloy based on stearic acid and dimethyl sulfoxide. *Tsvetnye Metally*, 10, 37-42. doi:10.17580/tsm.2021.10.05 (in Russ.)

20. Abrashov, A., Grigoryan, N., Korshak, Y., Vagramyan, T., Grafov, O. & Mezhev, Y. (2021). Regularities of the Formation of a Green Superhydrophobic Protective Coating on an Aluminum Alloy after Surface Modification with Stearic Acid Solutions. *Metals*, 11, 1718. <https://doi.org/10.3390/met11111718>

21. Abrashov, A., Grigoryan, N., Vagramyan, T. & Asnis, N. (2020). On the Mechanism of Formation of Conversion Titanium-Containing Coatings. *Coatings*, 10(4), 328. doi:10.3390/coatings10040328

#### Информация об авторах

**Петрушина Анастасия Алексеевна**, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ), г. Москва, Российская Федерация

**Абрашов Алексей Александрович**, к.т.н., доцент, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

**Григорян Неля Сетраковна**, к.х.н., профессор, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

**Хафизова Алсу Ильдаровна**, студент, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

**Аснис Наум Аронович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

**Касатикова Алина Сергеевна**, студент, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

**Парфенова Виктория Денисовна**, студент, РХТУ, г. Москва, Российская Федерация

#### Information about authors

**Anastasiya A. Petrushina**, postgraduate, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow, Russian Federation

**Aleksey A. Abrashov**, Ph.D. in Technology, associate professor, MUCTR, Moscow, Russian Federation

**Nelya S. Grigoryan**, Ph.D. in Chemistry, professor, MUCTR, Moscow, Russian Federation

**Alsu I. Hafizova**, student, MUCTR, Moscow, Russian Federation

**Naum A. Asnis**, Ph.D. in Technology, Leading Researcher, MUCTR, Moscow, Russian Federation

**Alina S. Kasatikova**, student, MUCTR, Moscow, Russian Federation

**Viktoriya D. Parfenova**, student, MUCTR, Moscow, Russian Federation



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

**Оценка локальной коррозии по данным,  
получаемым с датчиков электрического сопротивления**

**Т.Д. Гладких✉, А.Н. Маркин**

Филиал Тюменского индустриального университета в г. Нижневартовске,  
РФ, 628616, ХМАО-Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 2/П, стр. 9

*e-mail: gladkihtd@tyuiu.ru*

**Аннотация.** Осложнения, связанные с коррозивностью среды, по данным компании ПАО «НК «Роснефть» входят в число преобладающих на объектах нефтегазодобычи и занимают 4-е место среди других осложняющих добычу факторов – 12% осложненного механизированного фонда скважин. Поэтому диагностика и мониторинг состояния нефтепромыслового оборудования на предмет коррозионного износа является актуальным направлением повышения безотказности технологического процесса добычи и транспорта нефти. Метод «электрического сопротивления» (ЭС) является одним из методов коррозионного мониторинга, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли. Недостаток метода ЭС состоит в том, что приборы, используемые в настоящее время, не позволяют оценить неравномерность коррозионных потерь на поверхности материала, то есть не могут идентифицировать процесс развития локальной коррозии. Тем не менее, именно локальная коррозия обуславливает отказы нефтепромыслового оборудования.

В статье предложена физическая модель развития коррозии, отражающая взаимосвязь изменения сопротивления корродирующего элемента со скоростью коррозионного расхода. Процесс коррозии описан через частные случаи равномерной и локальной коррозии, имеющие разные скорости коррозионного расхода. По результатам анализа физической модели локальной коррозии, предложены способы интерпретации данных, получаемых с датчиков электрического сопротивления, который позволяет обнаружить проявление язвенной коррозии. Маркером развивающейся локальной коррозии является изменение динамики роста сопротивления чувствительного элемента.

**Ключевые слова:** коррозия, локальная коррозия, метод электрического сопротивления, оценка локальной коррозии, трубопроводы систем сбора нефти

**Для цитирования:** Гладких Т.Д., Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 20-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

*Получена 05.12.2023. Принята к публикации 20.01.2024. Опубликовано 01.03.2024.*

**Assessment of Local Corrosion Based  
on Data Obtained From Electrical Resistance Sensors**

**Tatiana D. Gladkih✉, Adrey N. Markin**

Nizhnevartovsk branch Industrial University of Tyumen,  
2/P, bld. 9, Lenina str., Nizhnevartovsk, 628616, Russian Federation

*e-mail: gladkihtd@tyuiu.ru*

**Abstract.** Complications related to the corrosive environment, according to Rosneft, are among the prevailing ones at oil and gas production facilities and occupy the 4th place among other factors complicating production – 12% of the complicated mechanized well stock. Therefore, diagnostics and monitoring of the condition of oilfield equipment for corrosion wear is an urgent direction for improving the reliability of the technological process of oil production and transportation. The «electrical resistance» (ES) method is one of methods of corrosion monitoring in the oil and gas industry. The disadvantage of the ES method is that the devices currently used do not allow to assess the unevenness of corrosion losses on the surface of the material, that is, they cannot identify the process of local corrosion development. Nevertheless, it is local corrosion that causes failures of oilfield equipment.

The article proposes a physical model of the development of corrosion, reflecting the relationship of changes in the resistance of a corroding element with the rate of corrosion consumption. The corrosion process is described through special cases of uniform and local corrosion having different rates of corrosion flow. Based on the results of the analysis of the physical model of local corrosion, methods for interpreting data obtained from electrical resistance sensors are proposed, which allows detecting the manifestation of ulcerative corrosion. A marker of developing local corrosion is a change in the dynamic of sensing element resistance growth.

**Keywords:** corrosion, localized corrosion, CO<sub>2</sub>-corrosion, corrosion rate calculation, electrical resistance method, estimation of local corrosion, pipelines of oil gathering system, downhole equipment

**For citation:** Gladkih, T. D., Markin, A. N. (2024). Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 20-26. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2>

Received December 05, 2023. Accepted for publication January 20, 2024. Published March 01, 2024.

## Введение

Внутренняя коррозия нефтепромыслового оборудования, включая трубопроводы систем сбора нефти и внутрискважинное оборудование добывающих скважин на месторождениях Западной Сибири, протекает по углекислотному механизму [1].

Основным видом коррозионных повреждений при углекислотной коррозии является локальная (язвенная) коррозия в виде язв и свищей [1-3]. Именно локальная коррозия внутренней поверхности трубопроводов систем сбора нефти приводит к нарушениям их герметичности, локальная коррозия насосно-компрессорных труб и другого внутрискважинного оборудования – к преждевременным подземным ремонтам скважин, необходимости замены оборудования, вышедшего из строя в результате коррозии, и временным потерям добычи нефти.

Одним из методов коррозионного мониторинга, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли, является метод электрического сопротивления (ЭС). Метод основан на том, что при изменении, в результате коррозии, геометрических размеров металлического проводника изменяется его электрическое сопротивление, так как величина электрического сопротивления металлического проводника зависит от его геометрических размеров. Этот метод, а также датчики и приборы, с помощью которых его реализуют, часто называют ER (по аббревиатуре английского названия метода Electrical Resistant). Преимущество метода ЭС – универсальность: он применим как в электролитах (водная фаза продукции скважин и трубопроводов, водонефтяная эмульсия типа нефть в воде), так и в жидкостях с низкой электрической проводимостью – углеводороды, водонефтяная

эмульсия типа вода в нефти; получение информации о скорости коррозии в реальном времени (с интервалом от 6 часов). Недостаток метода ЭС – приборы, используемые в настоящее время, не позволяют оценить локальную коррозию.

Цель настоящей работы – предложить способ интерпретации данных, получаемых с датчиков ЭС, который позволит оценить локальную коррозию.

## Модель и расчеты

Рассмотрим изменение электрического сопротивления (далее – «сопротивление») чувствительного элемента (ЧЭ) датчика ЭС в случаях равномерной коррозии и «локальной (язвенной) + равномерной» коррозии.

### 1. Равномерная коррозия

На рис. 1 схематично показан ЧЭ датчика ЭС.

Электрическое сопротивление ЧЭ зависит от удельного сопротивления металла, из которого изготовлен ЧЭ, и его геометрических размеров:

$$R = \frac{\rho l}{Dh} = \frac{\rho l^2}{Dhl} = \frac{\rho l^2}{v}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

$l$ ,  $D$ ,  $h$  – длина, ширина и толщина ЧЭ соответственно, м;

$v$  – объем ЧЭ, м<sup>3</sup>.

В результате равномерной коррозии (показателем которой является коррозионный расход –  $KP$ , массовый показатель коррозии, кг/(м<sup>2</sup>·с)) за время  $t$  толщина ЧЭ уменьшается, а сопротивление увеличивается:

$$R = \frac{\rho l^2}{D(h - KP \cdot t)l} = \frac{\rho l}{D(h - KP \cdot t)}, \quad (2)$$

где  $KP$  – коррозионный расход, выраженный в м/с (так как коррозия равномерная, то мас-

совый показатель коррозии  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  корректно пересчитывать в глубинный показатель коррозии (глубину проникновения)  $\text{м}/\text{с}$ .<sup>1</sup>

По изменению сопротивления от  $R_1$  до  $R_2$  за время  $\Delta t$  рассчитывают  $KP$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ):

$$KP = \frac{\rho l}{(R_2 - R_1) D \Delta t} \cdot \rho_{Me}, \quad (3)$$

где  $\rho_{Me}$  – плотность металла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

## 2. Локальная (язвенная) + равномерная коррозия

«Язвенная коррозия характеризуется тем, что, начавшись в одной точке на поверхности металла, идет далее примерно с одинаковой скоростью как вглубь металла, так и на поверхности. Глубина поражения сопоставима с диаметром язвы. Склоны язв хорошо выражены, площадь дна намного меньше площади поверхности. Глубина проникновения от 1 до 5  $\text{мм}/\text{год}$ »<sup>2</sup>. В реальных нефтепромышленных системах геометрические формы локальной коррозии очень разнообразны – от «конусов» и «цилиндров» (рис. 2а, б) до «полусфер» (рис. 2с), однако, как будет видно из дальнейшего изложения, для предмета рассмотрения данной работы это не имеет существенного значения – поэтому будем считать, что локальная коррозия проявляет себя не в виде конусов (как описано в приведенной выше цитате), а в виде «цилиндров» (рис. 3).

На ЧЭ датчиков ЭС наряду с равномерной протекает локальная коррозия [3]. На рис. 3 приведена фотография ЧЭ с характерными локальными повреждениями. Однако традиционная (по формуле (3)) интерпретация сигнала датчика ЭС не позволяет диагностировать проявление локальной коррозии.

Примем следующую модель развития локальной (язвенной) коррозии (рис. 4).

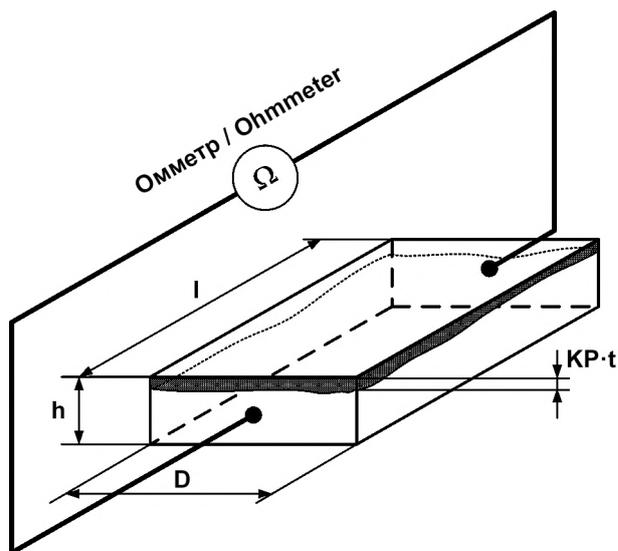


Рис. 1. Схема чувствительного элемента датчика электрического сопротивления и уменьшение его толщины в результате равномерной коррозии

Fig. 1. Diagram of the sensitive element resistance and a decrease in its thickness as a result of uniform corrosion

Язвы развиваются в виде прямых цилиндров;  $n$  – количество зародившихся и развивающихся язв на единице площади поверхности,  $\text{шт}/\text{м}^2$ ;  $V$  – скорость локальной коррозии в язвах (как в глубину металла, так и по поверхности),  $\text{м}/\text{с}$ .

При развитии язв и в результате равномерной коррозии объем ЧЭ уменьшается, следовательно, изменяется площадь сечения ЧЭ, что приводит к возрастанию сопротивления ЧЭ (формула 4).

В знаменателе первой части формулы (4) первый член – начальный объем ЧЭ; второй – объем язв ( $nDl$  прямых цилиндров диаметром и глубиной); третий – объем, потерянный ЧЭ в результате равномерной коррозии.

Если язвы развиваются в виде конусов, то второй член в знаменателе первой части

$$R = \frac{\rho l^2}{Dhl - nDl \frac{\pi(V \cdot t)^2}{4} Vt - Dlt \cdot KP} = \frac{\rho l}{D(h - n \frac{\pi(V \cdot t)^3}{4} - t \cdot KP)}. \quad (4)$$

<sup>1</sup>В случае неравномерной коррозии  $KP$  выражают в  $\text{мм}/\text{год}$  только в условном пересчете, то есть для сравнения в одних и тех же единицах разных по своей сути коррозионных повреждений.

<sup>2</sup>Классификатор коррозии ПАО «НК «Роснефть», 2018 г.

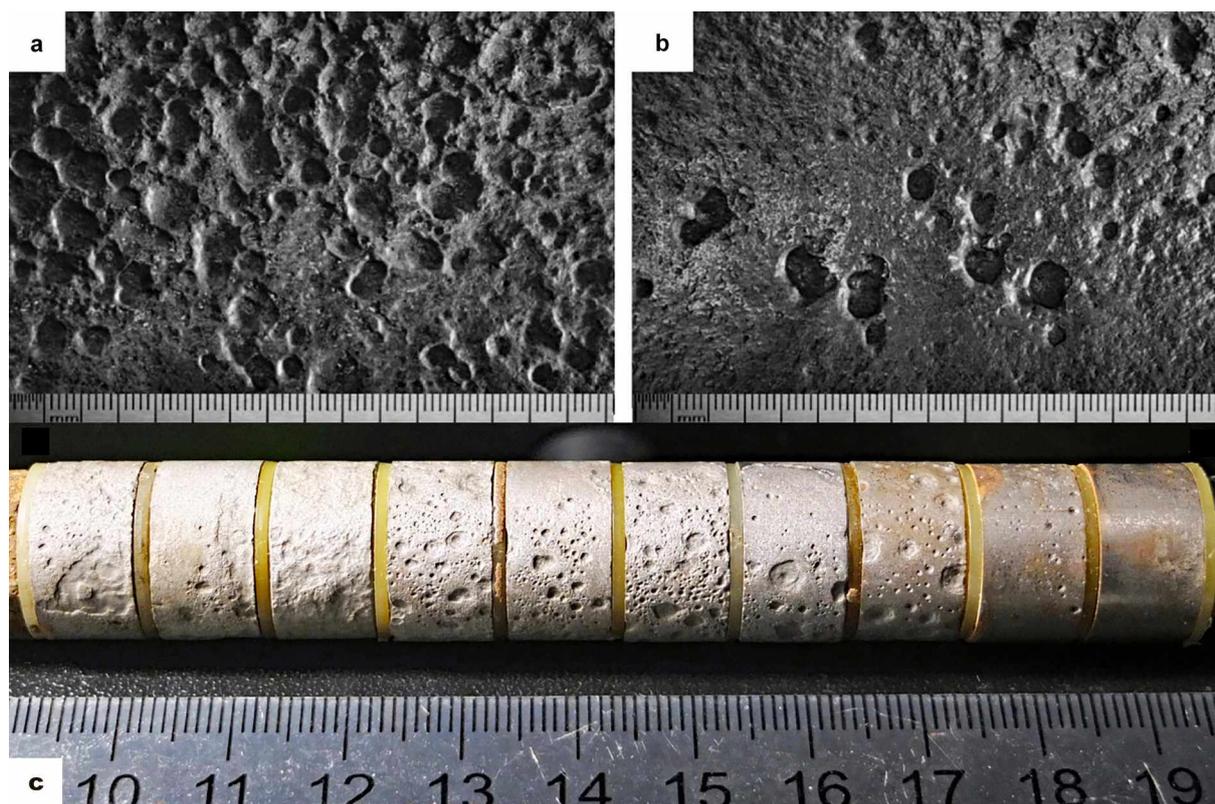


Рис. 2. Геометрические формы локальной коррозии: а, б – «конусы» и «цилиндры» (локальная коррозия внутренней поверхности трубопровода системы сбора нефти Приобского месторождения [2]); с – «цилиндры» и «полусферы» (кассета с образцами контроля коррозии, экспонировавшаяся в трубопроводе системы сбора нефти Ватинского месторождения, 2020 г.)

Fig. 2. Geometric shapes of local corrosion: a, b – «cones» and «cylinders» (local corrosion of the inner surface of the pipeline of the oil collection system of the Priobskoye field [2]); c – «cylinders» and «hemispheres» (a cassette with corrosion control samples exposed in the pipeline of the oil collection system of the Vatin'sky field, 2020)

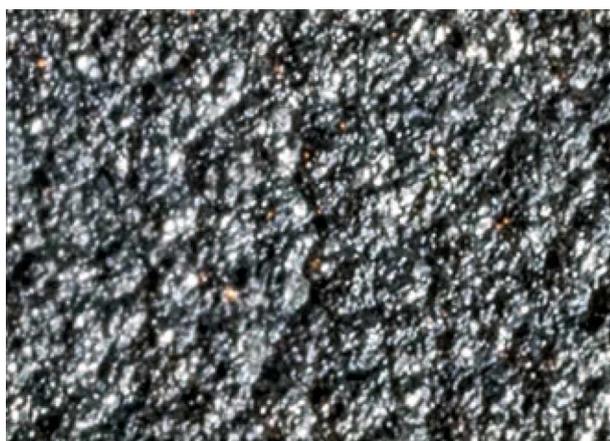


Рис. 3. Проявление локальной коррозии на поверхности чувствительных элементов датчиков электрического сопротивления,  $\times 100$  [5]

Fig. 3. Manifestation of local corrosion on the surface of sensitive element ER-sensors,  $\times 100$  [5]

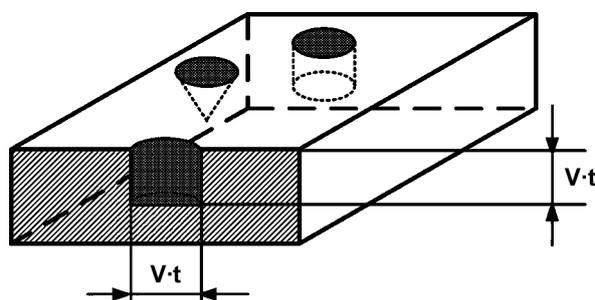


Рис. 4. Модель развития (локальной) язвенной коррозии на поверхности чувствительного элемента датчика электрического сопротивления

Fig. 4. A model of the development of (local) ulcerative corrosion on the surface of sensitive element ER-sensors

формулы (4) (объем язв), имеет вид:

$$V_i = nDl \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi(V \cdot t)^2}{4} Vt = nDl \frac{\pi(V \cdot t)^3}{12}, \quad (5)$$

где  $nDl$  – количество язв в виде конусов;  
 $V \cdot t$  – диаметр и глубина язв в виде конусов.

В этом случае, зависимость сопротивления  $R$  от времени и скорости локальной коррозии, с точностью до коэффициента, такая же, как в формуле (4).

В [4, 5] методами оптической микроскопии и сканирующей рефлектометрии исследовали коррозию стального образца в минерализованном азириванном растворе. Показано, что через 10 мин. после погружения образца в раствор на поверхности стали возникают первые локальные коррозионные повреждения; в дальнейшем их количество значительно увеличивается – через 200 мин. поверхностная концентрация локальных коррозионных повреждений составляет  $\sim 600$  шт./см<sup>2</sup>, средний радиус повреждений  $\sim 100$  мкм. При длительных

испытаниях коррозия развивается преимущественно через углубления образовавшихся локальных повреждений, глубина которых через несколько часов превышает 100 мкм, а через 33 сут. в отдельных повреждениях достигает 600 мкм. Усредненный радиус коррозионных повреждений через 33 сут. – 247 мкм. Скорость локальной коррозии через 33 сут. – 6,6 мм/год при  $KP$ , измеренным весовым методом,  $\sim 0,04$  г/(м<sup>2</sup>×ч).

На рис. 5 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС ( $R_t/R_{нач.}$ , где  $R_t$  – сопротивление ЧЭ в момент времени  $t$ ;  $R_{нач.}$  – начальное сопротивление ЧЭ) от времени, рассчитанные для случая равномерной коррозии (формула (2)) при различном  $KP$ .

Зависимость  $R$  от  $t$ , согласно формуле (2), нелинейная, но, как видно из данных рис. 5, нелинейность мала, ее не видно на графиках вплоть до  $KP = 2,00$  мм/год (отметим, что  $KP > 1$  мм/год не наблюдается в реальных нефтепромысловых системах, типичные

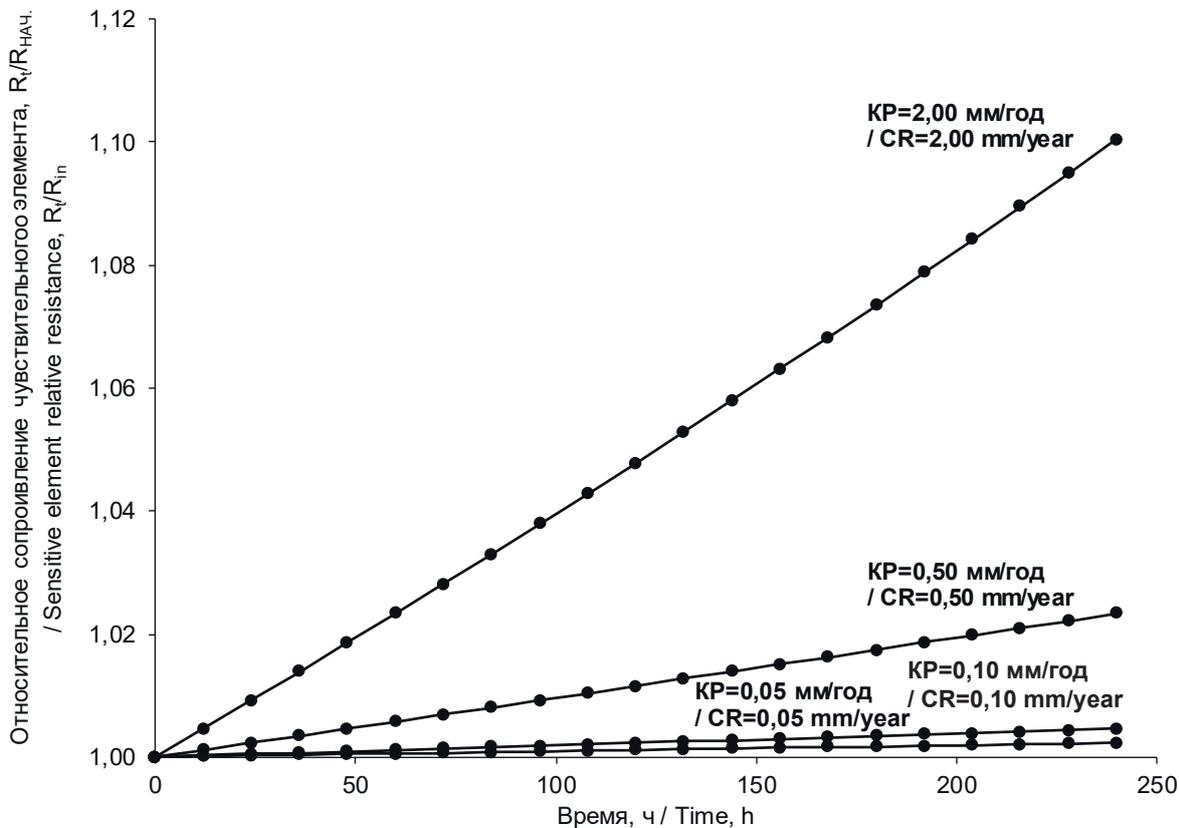


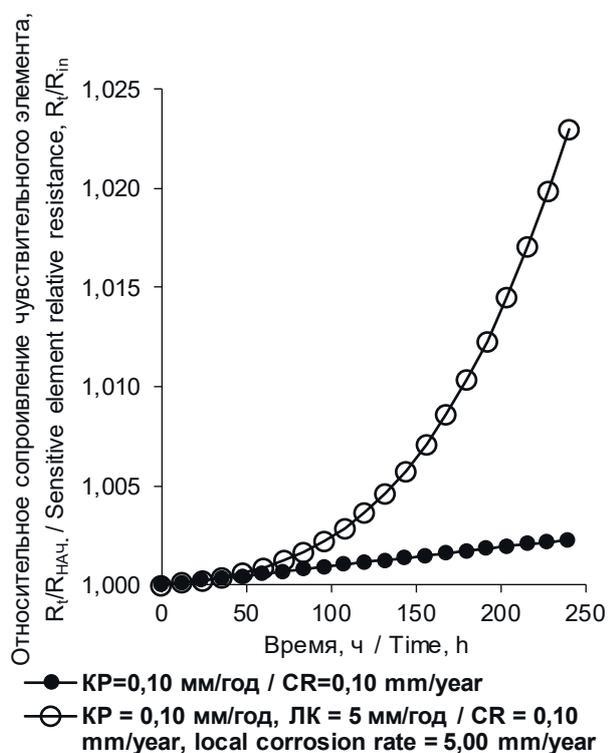
Рис. 5. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени при различном  $KP$ ;  
 $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Ом·м;  $l = 10$  см;  $D = 2$  мм;  $h = 0,6$  мм

Fig. 5. The dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time at different  $CR$ :  $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Oh·m;  $l = 10$  cm;  $D = 2$  mm;  $h = 0,6$  mm

значения КР – от 0,05 до 0,20 мм/год [1]), нелинейность существенно проявляется лишь при  $t > 180 - 365$  суток для  $KP = 1...2$  мм/год. Поэтому для подавляющего большинства практических случаев использования приборов ЭС можно принять, что зависимость  $R$  от  $t$  при равномерной коррозии линейна (в контексте дальнейшего изложения).

На рис. 6 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС от времени, рассчитанные для случая «локальная (язвенная) + равномерная коррозия» (формула (4)).

При локальной коррозии отклонение от линейности проявляется уже через 48...60 ч. В практическом плане это можно использо-



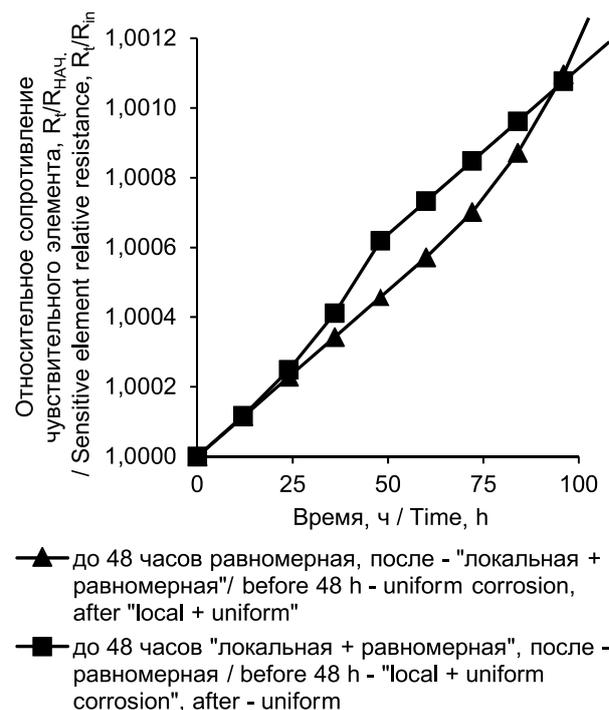
**Рис. 6. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени для случая «локальная (язвенная) + равномерная коррозия»;  $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Ом·м;  $l = 10$  см;  $D = 2$  мм;  $h = 0,6$  мм;  $n = 600$  шт./м<sup>2</sup>;  $V = 5$  мм/год;  $KP = 0,10$  мм/год**

**Fig. 6. Dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time for the case of «local (ulcerative) + uniform corrosion»;  $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Ohm·m;  $l = 10$  cm;  $D = 2$  mm;  $h = 0,6$  mm;  $n = 600$  pcs./m<sup>2</sup>;  $V = 5$  mm/y;  $KP = 0,10$  mm/y**

вать следующим образом: если зависимость  $R$  от  $t$  отклоняется от «линейности» больше, чем по формуле (2), то это означает, что на ЧЭ протекает локальная коррозия, о чем прибор должен сигнализировать.

С течением времени образовавшиеся язвы: 1) могут перестать расти – коррозия перейдет в равномерную; 2) возможно зарождение и развитие новых язв; 3) язвы могут перестать расти по поверхности, но продолжить расти вглубь металла, тогда второй член знаменателя формулы (4) будет линейно зависеть от времени и формула (4) «переходит» в формулу (2).

На рис. 7 показаны графики зависимости относительного сопротивления ЧЭ датчика ЭС от времени, когда через 48 ч равномерной коррозии начали расти язвы и когда язвы росли до 48 ч, а потом перестали – в обоих случаях на графиках появляются «перегибы».



**Рис. 7. Зависимость относительного сопротивления чувствительного элемента датчика электрического сопротивления от времени;  $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Ом·м;  $l = 10$  см;  $D = 2$  мм;  $h = 0,6$  мм;  $n = 600$  шт./м<sup>2</sup>;  $V = 5$  мм/год;  $KP = 0,05$  мм/год**

**Fig. 7. Dependence of the sensitive element relative resistance of ER-sensors on time;  $\rho = 1,69 \cdot 10^{-7}$  Ohm·m;  $l = 10$  cm;  $D = 2$  mm;  $h = 0,6$  mm;  $n = 600$  pcs./m<sup>2</sup>;  $V = 5$  mm/y;  $KP = 0,05$  mm/y**

Наличие «перегибов» на графиках  $R = f(t)$  также позволяет идентифицировать начало или прекращение проявления локальной коррозии.

Известно, что  $KP$  и скорость локальной коррозии максимальны в первые минуты/часы после начала контакта металла с коррозионной средой, далее  $KP$  и скорость локальной коррозии снижаются и через 6...48 ч стабилизируются. Поэтому анализ кривых зависимости сопротивления от времени следует проводить через 36...48 ч после погружения датчика ЭС в коррозионную среду.

### Выводы

На основании физической модели развития локальной коррозии предложены способы интерпретации данных, получаемых с датчиков электрического сопротивления, которые позволяют обнаружить проявление локальной коррозии.

Предложенная методика выявления локальной коррозии позволяет разработать алгоритмы работы систем диагностики состояния трубопроводного транспорта, может применяться в системах мониторинга технического состояния оборудования.

Разработка физических моделей развития локальной коррозии является важным направлением совершенствования технических средств диагностики состояния нефтепромышленного оборудования.

### Литература

1. Ткачева В.Э., Бриков А.В., Лунин Д.А., Маркин А.Н. Локальная  $CO_2$ -коррозия нефтепромышленного оборудования. – Уфа: РН-БашНИПИнефть, 2021. – 168 с.
2. Выборщик М.А. Деградация и разрушение нефтегазопроводных труб в средах с высоким содержанием углекислого газа и ионов хлора / М.А. Выборщик, А.В. Иоффе, Т.В. Тетюева и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – № 4. – С. 29-36.
3. Муратов К. Р. Оценка влияния неоднородности коррозионного процесса по показаниям резистивных датчиков - свидетелей коррозии / К.Р. Муратов, В.А. Рышков // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 20-23.

### Информация об авторах

**Гладких Татьяна Дмитриевна**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, Филиал «Тюменский индустриальный университет» в г. Нижневартовске, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Российская Федерация  
**Маркин Андрей Николаевич**, к.т.н., доцент, Филиал «Тюменский индустриальный университет» в г. Нижневартовске, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Российская Федерация

родности коррозионного процесса по показаниям резистивных датчиков - свидетелей коррозии / К.Р. Муратов, В.А. Рышков // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 20-23.

4. Maleeva M.A. Local Corrosion Dissolution of Steel in Earth-Simulating Solutions / M.A. Maleeva, M.A. Petrunin, L.B. Maksaeva et al. // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2016. – V. 52, No. 7. – P. 1137-1143.

5. Малеева М.А. Локальное коррозионное растворение стали в растворах, имитирующих грунтовой электролит / М.А. Малеева, М.А. Петрунин, Л.Б. Максаева и др. // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 11. – С. 1-7.

### References

1. Tkacheva, V. E., Brikov, A. V., Lunin, D. A., & Markin, A. N. (2021). *Local  $CO_2$  corrosion of oilfield equipment*. Ufa: RN-BashNIPIneft'. (in Russ.)
2. Vyboyschik, M. A., Ioffe, A. V., Tetyueva, T. V., Revyakin, V. A., & Gruzkov, I. V. (2020). Degradation and destruction of oil and gas pipelines in environments with a high content of carbon dioxide and chlorine ions. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, (4), 29-36. (in Russ.)
3. Muratov, K. R., Rushkov, V. A. (2010). Estimation of the influence of corrosion process heterogeneity based on corrosion witness resistive sensors data. *Sensors and systems*, (10), 20-23. (in Russ.)
4. Maleeva, M. A., Petrunin, M. A., Maksaeva, L. B., Yurasova, T. A., & Marshakov, A. I. (2016). Local Corrosion Dissolution of Steel in Earth-Simulating Solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 52(7), 1137-1143.
5. Maleyeva, M. A., Petrunin, M. A., Maksayeva, L. V., Yurasov, T. A., & Marshakov, A. I. (2014). Localized corrosion dissolution of steel in solutions imitating soil electrolyte. *Corrosion: protection, materials*, (11), 1-7. (in Russ.)

### Information about authors

**Tatiana D. Gladkikh**, Ph.D. in Technology, associate professor, head of the department, Industrial University of Tyumen a branch in Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra, Nizhnevartovsk, Russian Federation  
**Andrey N. Markin**, Ph.D. in Technology, associate professor, Industrial University of Tyumen a branch in Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous territory – Yugra, Nizhnevartovsk, Russian Federation



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

**Ингибирующие свойства отвара Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали в сернокислых средах**

П.А. Николайчук✉, П.А. Васильев, Ю.А. Енова

Курганский государственный университет,  
РФ, 640020, г. Курган, ул. Советская, д. 63, стр. 4

e-mail: [pavel.nikolaychuk@kgsu.ru](mailto:pavel.nikolaychuk@kgsu.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено использование соединений, экстрагированных из природных источников и отходов пищевой промышленности, в частности – растительного сырья, как перспективного направления поиска ингибиторов коррозии.

Изучено ингибирующее влияние отвара из листьев и цветов Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали Ст3 в среде 0,5 М серной кислоты методами электрохимической поляризации и спектроскопии электрохимического импеданса.

Показано, что добавка 100 мг/л экстракта Melissa officinalis уменьшает скорость коррозии на 15%, а добавка 10 г/л – на 75%. Адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали имеет физическую природу, описывается адсорбционной моделью Ленгмюра с хорошим коэффициентом достоверности аппроксимации. Вычисленная энергия Гиббса процесса адсорбции не превышает – 20 кДж/моль. Определенные в работе эффективности ингибирования коррозии низкоуглеродистой стали в среде серной кислоты экстрактом Melissa officinalis сравнимы со значениями эффективностей ингибирования коррозии сталей в соляной кислоте. Отвар Melissa officinalis показал себя как эффективный и экологичный состав для замедления коррозии сталей в кислых средах.

**Ключевые слова:** *Melissa officinalis*, отвар, ингибирование коррозии в кислых средах, нержавеющая сталь, электрохимическое исследование, спектроскопия электрохимического импеданса, изотерма адсорбции Ленгмюра

**Для цитирования:** Николайчук П.А., Васильев П.А., Енова Ю.А. Ингибирующие свойства отвара Melissa officinalis против коррозии низкоуглеродистой стали в сернокислых средах // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 27-36. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

Получена 05.09.2023. Принята к публикации 20.11.2023. Опубликовано 01.03.2024.

**Финансирование.** Финансирование работы осуществлялось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № проекта 720000Ф.99.1.БН60АА13000).

**The Inhibitory Properties of Lemon Balm (*Melissa officinalis*) Boiling Extract on the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Medium**

Pavel A. Nikolaychuk✉, Pavel A. Vasilyev, Yulia A. Enova

Kurgan State University,  
bld. 4, 63, Sovetskaya st., Kurgan, 640020, Russian Federation

e-mail: [pavel.nikolaychuk@kgsu.ru](mailto:pavel.nikolaychuk@kgsu.ru)

**Abstract.** The use of compounds extracted from natural sources and waste from the food industry, in particular plant materials, is considered as a promising direction in the search for corrosion inhibitors.

The inhibitory ability of the boiling extract from the leaves and the flowers of *Melissa officinalis* on the corrosion of mild stainless steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid medium investigated using electrochemical methods and EIS.

It was shown that the addition of 100 mg/L of the *Melissa officinalis* extract reduces the corrosion rate by 15%, and that of 10 g/L – by 75%. The adsorption of the extract components on a steel surface follows the Langmuir adsorption model, and the nature of adsorption is mostly physical.

The adsorption of extract components on the steel surface is described by the Langmuir adsorption model with



a good approximation reliability coefficient. The calculated Gibbs energy of the adsorption process does not exceed  $-20$  kJ/mol, which indicates the physical nature of adsorption. The efficiencies of corrosion inhibition of low-carbon steel in sulfuric acid with lemon balm extract, determined in the work, are comparable to the values of its efficiencies of corrosion inhibition of steels in hydrochloric acid.

The *Melissa officinalis* extract shows itself as perspective and environmentally friendly substance for reducing the steel corrosion rate in acidic environments.

**Keywords:** *Melissa officinalis*, boiling extracts, acid medium corrosion inhibition, stainless steel, electrochemical study, electrochemical impedance spectroscopy, Langmuir adsorption isotherm

**For citation:** Nikolaychuk, P. A., Vasilyev, P. A., & Enova, Y. A. (2024). The Inhibitory Properties of Lemon Balm (*Melissa officinalis*) Boiling Extract on the Corrosion of Mild Steel in Sulphuric Acid Medium. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 27-36. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-3>

Received September 05, 2023. Accepted for publication November 31, 2023. Published March 01, 2024.

**Funding.** The work was financed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project registration number 720000F.99.1.BN60AA13000).

### Введение

Использование побочных продуктов промышленных производств [1], лекарственных средств с истекшим сроком годности [2], а также соединений, экстрагированных из природных источников [3, 4], является перспективным направлением поиска ингибиторов кислотной коррозии металлов, и в последнее время всё больше привлекает внимание исследователей. Использование природных соединений снижает затраты на поиск и целенаправленный синтез ингибиторов, кроме того, природные ингибиторы коррозии после использования не загрязняют окружающую среду. Обычно в роли ингибиторов используют экстракты из корней, листьев, цветов, плодов и семян различных растений [5, 6]. Это также открывает путь для повторного использования биомассы и отходов пищевой промышленности [7, 8].

Мелисса лекарственная используется как ароматическое и лекарственное растение и широко культивируется во многих странах мира. Её надземные части (листья и цветы) содержат монотерпены (цитраль, гераниол, нерол, цитронеллол, цитронеллаль) и терпеноиды (линалоол, геранилацетат, мирцен, парацимол,  $\beta$ -кариофилленоксид,  $\beta$ -кариофиллен и др.), фенилпропаноиды (коричная кислота, розмариновая кислота и её этиловый эфир, кофейная кислота, хлорогеновая кислота, п-кумаровая кислота, феруловая кислота, синаповая кислота), флавоноиды (апигенин, космосиин, лютеолин, цинарозид, рамноцитрин, изокверцитрин, рамназин), фенолкарбоновые кислоты (гентиизиновая, салициловая, п-гидроксibenзойная, ванилиновая, сирене-

вая, протокатеховая), кумарины, витамины В1, В2, С,  $\beta$ -каротин [9-11]. Известно, что и терпеноиды, и флавоноиды, и кумарины, и некоторые витамины являются перспективными ингибиторами коррозии [12-14]. Ранее [15-17] уже был показан ингибирующий эффект этанольных экстрактов мелиссы лекарственной против коррозии высокоуглеродистых сталей в солянокислых средах. Однако при изучении коррозионных свойств сплавов в кислых средах, наряду с соляной кислотой, в качестве агрессивной среды используется также и серная кислота [14], ингибирующие свойства мелиссы лекарственной в которой ранее исследованы не были. Поэтому в настоящей работе исследуется влияние отвара мелиссы лекарственной на коррозионные свойства стали Ст3 в 0,5 М растворе серной кислоты.

### Реактивы и оборудование

Пропан-2-ол (чда) и серная кислота (хч) приобретались у ООО «Ленреактив». Стальные электроды производились из цилиндрических слитков низкоуглеродной стали Ст3 (содержащей не более 0,14% С, 0,3% Ni, Cu, и Cr, 0,05% Si, 0,4% Mn, 0,05% P и 0,04% S). Плоская торцевая поверхность слитка изолировалась эпоксидной смолой, а площадь рабочей поверхности электрода (внешней поверхности цилиндра), погружаемой в раствор, составляла 6,3 см<sup>2</sup>.

Взвешивание образцов проводилось на аналитических весах НТ-224RCE (Vibra) с точностью 0,0001 г. Электрохимические и импедансные исследования проводились при помощи потенциостата-гальваностата Р-45Х с анализатором частотного отклика FRA-24М

(ООО «Electrochemical Instruments»). Для экранирования электрохимической ячейки использовался экранирующий шкаф Ш-3М (ООО «Electrochemical Instruments»). Для приготовления растворов использовалась дистиллированная вода, полученная при помощи аквадистиллятора АЭ-10 (ООО «Ливам»). Для нагрева и перемешивания растворов использовалась магнитная мешалка RET control-visc (IKA). Бумажные фильтры «чёрная лента» с диаметром пор 12 мкм приобретались у ООО «Ареолаб». Использовалась стеклянная лабораторная посуда второго класса точности.

### Методики и материалы исследования

**Приготовление экстрактов.** Надземные части (листья и цветы) дикорастущих растений Melissa лекарственной были собраны в лесу близ города Курган (55°24'25" с. ш., 65°27'26" в. д.) в период цветения растения в начале августа и высушены на воздухе в течение трёх месяцев.

Навеска в 100 г смеси высушенных листьев и цветов растения помещалась в колбу для перегонки, заливалась 1 л дистиллированной воды, нагревалась до кипения и кипятилась с обратным холодильником в течение 3 ч. Полученный отвар охлаждался до комнатной температуры, и твёрдый остаток отфильтровывался через фильтр «чёрная лента».

Аликвота 10 мл отвара помещалась в химический стакан и выпаривалась досуха, определялась масса растворённых соединений и их исходная концентрация в отваре. После этого готовились рабочие растворы водных экстрактов Melissa лекарственной с концентрациями, варьируемыми от 0,2 до 20 г/л, соответствующим разбавлением исходного отвара. Приготовленные растворы разбавлялись равными объёмами 1 M серной кислоты, в результате получались кислотные рабочие растворы экстракта Melissa лекарственной с концентрациями от 0,1 до 10 г/л в 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

**Поляризационные измерения.** Электроды из стали Ст3 с площадью рабочей поверхности 6,3 см<sup>2</sup> полировались наждачной бумагой P2500 и обезжиривались пропан-2-олом. Измерения выполнялись в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке,

состоящей из рабочего электрода (образца стали), вспомогательного графитового электрода и хлоридсеребряного электрода сравнения. Ячейка помещалась в экранирующий шкаф. Потенциал открытой цепи (коррозионный потенциал,  $E_{кор}$ ) записывался в течение 30 мин. Результат показан на рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые записывались в интервале потенциалов от -500 до +500 мВ относительно измеренного потенциала открытой цепи со скоростью развёртки потенциала 10 мВ/с. Каждый эксперимент повторялся трижды. Полученные поляризационные кривые представлялись в координатах  $E(\lg i)$ , после чего вычислялись тафельские наклоны анодной ( $b_a$ ) и катодной ( $b_k$ ) ветвей кривых, и по их пересечению оценивались коррозионные плотности тока ( $i_{кор}$ ) [14]. Эффективность ингибирования компонентов экстракта определялась из отношения коррозионных плотностей тока в отсутствие ( $i_0$ ) и присутствии ( $i$ ) ингибитора:  $ЭИ = (i_0 - i) / i_0 \cdot 100\%$  [14]. Результаты показаны на рис. 2 и в табл. 1.

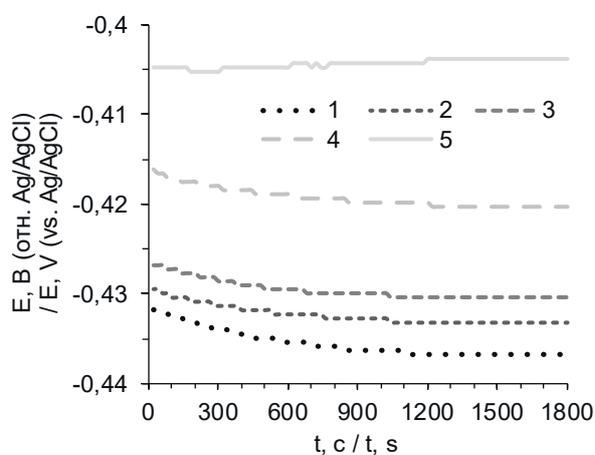


Рис. 1. Потенциал открытой цепи для стального электрода, погружённого в 0,5 M серную кислоту без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 мин выдержки

Fig. 1. An open circuit potential for the steel electrode, immersed into 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1) and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

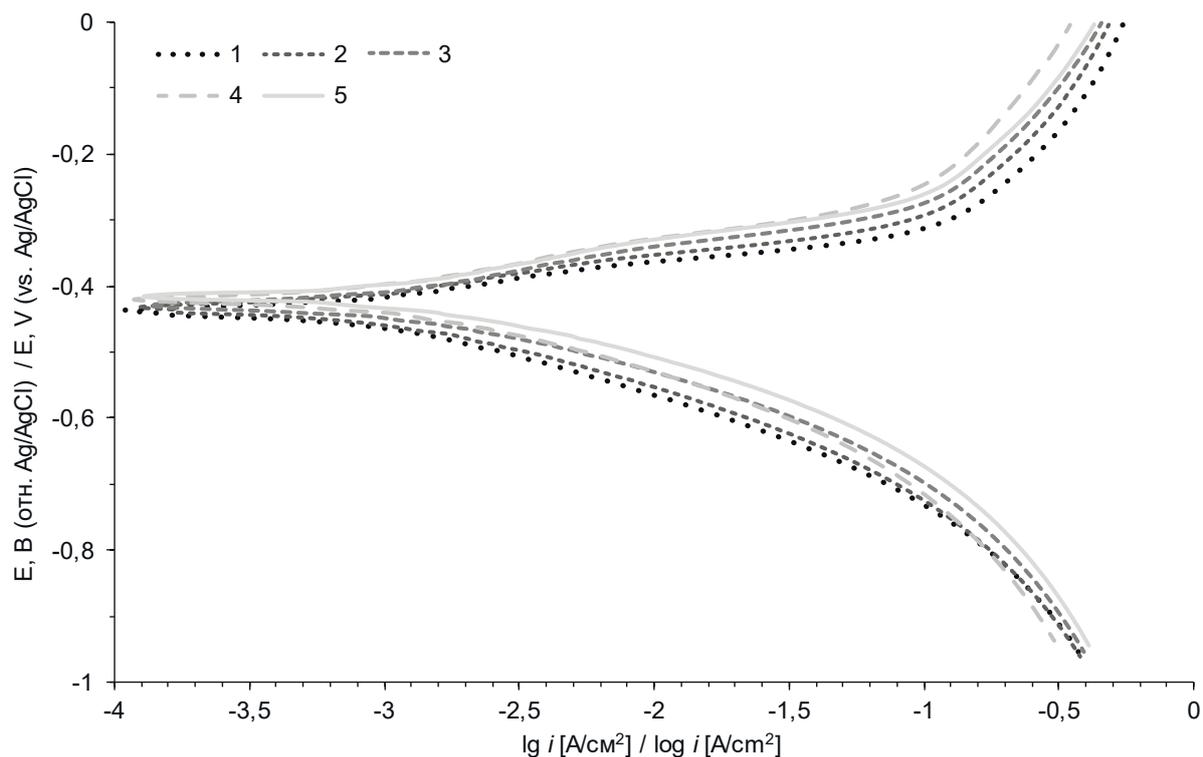


Рис. 2. Поляризационные кривые стали Ст3 в 0,5 М серной кислоте без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 минут выдержки

Fig. 2. The polarization curves for the steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1) and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

Таблица 1. Результаты электрохимических измерений скорости коррозии

Table 1. The results of the electrochemical measurements of the corrosion rate

$c_u$ , мг/л / $c_p$ , mg/l	$E_{кор}$ , мВ / $E_{cor}$ , mV	$b_a$ , мВ/дек / $b_a$ , mV/dec	$b_k$ , мВ/дек / $b_c$ , mV/dec	$i_{кор}$ , мА/см <sup>2</sup> / $i_{cor}$ , mA/cm <sup>2</sup>	ЭИ, % / IE, %
0	- 437	422	- 205	26,7	—
100	- 433	380	- 235	22,0	17,6
400	- 429	332	- 195	17,1	35,7
2000	- 420	271	- 220	11,4	57,3
10000	- 404	149	- 164	5,4	79,7

Измерения методом спектроскопии электрохимического импеданса. Электроды из стали Ст3 с площадью рабочей поверхности  $6,3 \text{ см}^2$  полировались наждачной бумагой P2500 и обезжиривались пропан-2-олом. Измерения выполнялись в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке, состоящей из рабочего электрода (образца стали), вспомогательного графитового электрода и хлоридсеребряного электрода сравнения. Потенциал открытой цепи записывался в течение 30 мин. Значения импеданса записывались при измеренном потенциале открытой цепи в интервале частот переменного тока от 1 Гц до 10 кГц с амплитудой колебаний потенциала 10 мВ. Каждый эксперимент повторялся трижды. Полученные результаты представлены в виде амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых частотных характеристик [18]. Оценка параметров импеданса проводилась в рамках упрощённой эквивалентной схемы

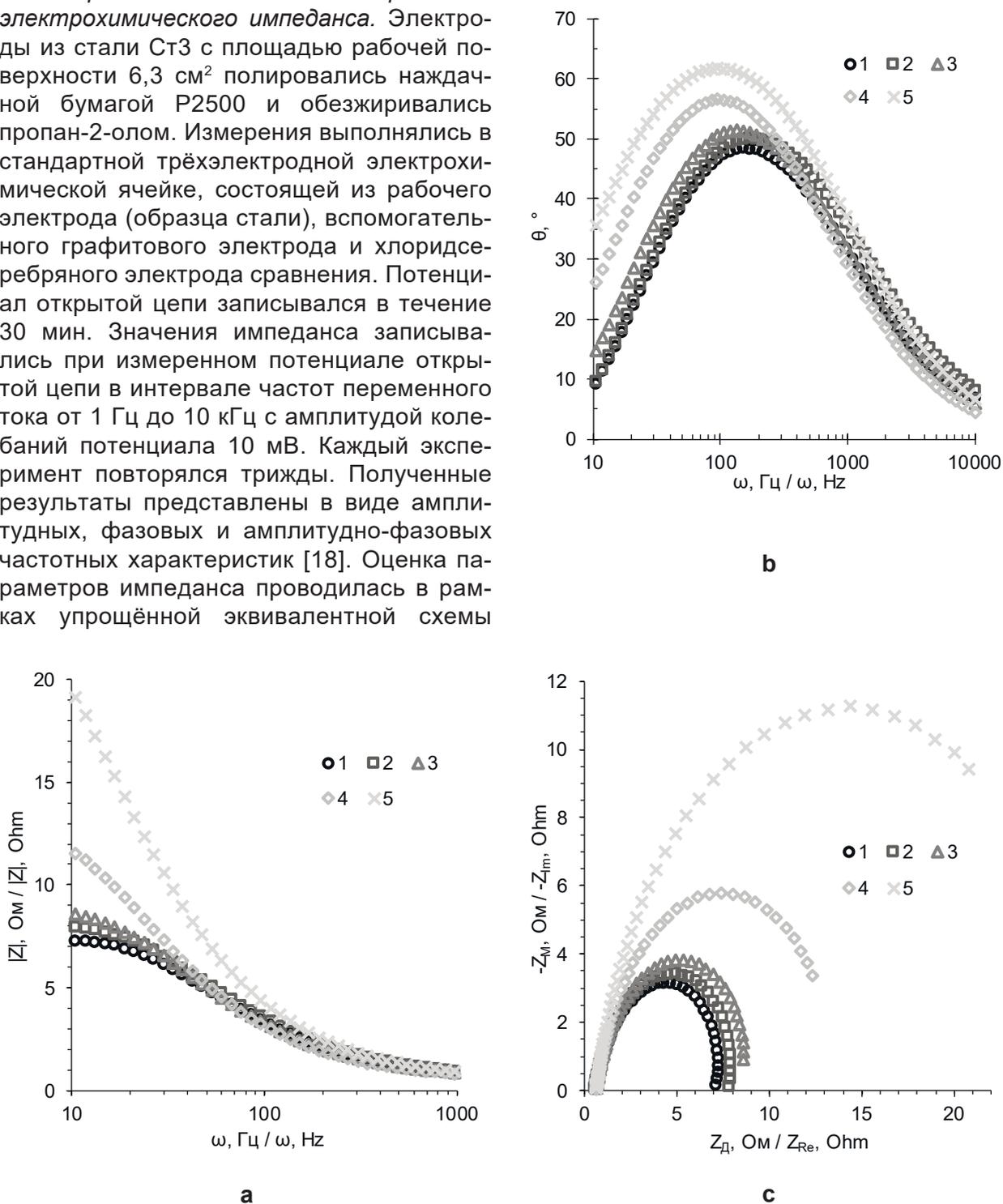


Рис. 3. а) амплитудная, б) фазовая и с) амплитудно-фазовая частотные характеристики стали Ст3 в 0,5 M серной кислоте без добавок ингибитора (1) и с добавками экстракта Melissa лекарственной концентрации 100 мг/л (2), 400 мг/л (3), 2 г/л (4) и 10 г/л (5) после 30 мин выдержки

Fig. 3. a), b) the Bode plot, and c) the Nyquist plot for the steel EN Fe37-3FN in 0,5 M sulphuric acid without addition of the inhibitor (1), and with additions of the lemon balm extracts with the concentration of 100 mg/l (2), 400 mg/l (3), 2 g/l (4) and 10 g/l (5) after 30 min of exposure

Таблица 2. Результаты импедансных измерений скорости коррозии  
Table 2. The results of the impedance measurements of the corrosion rate

$c_u$ , мг/л / $c_i$ , mg/l	$R_p$ , Ом / $R_s$ , Ohm	$P$ , мОм <sup>-1</sup> ·с <sup>n</sup> / $P$ , mOhm <sup>-1</sup> ·s <sup>n</sup>	$n$	$R_{nz}$ , Ом / $R_{ct}$ , Ohm	ЭИ, % / IE, %
0	0,59	1,22	0,85	8,0	–
100	0,52	1,16	0,85	8,8	9,1
400	0,54	1,24	0,86	9,7	17,5
2000	0,49	1,29	0,87	14	42,9
10000	0,53	1,02	0,84	29	72,4

Рэндлеса [18], содержащей сопротивление раствора  $R_p$ , последовательно соединённый с ним элемент постоянной фазы, представляющий двойной электрический слой, комплексное сопротивление которого описывается выражением  $1/Z = P \cdot (i \cdot \omega)^n$ , где  $P$  и  $n$  – параметры,  $\omega$  – частота переменного

тока, и параллельно соединённое с ним сопротивление переноса заряда через пассивирующий слой  $R_{nz}$ . Подбор параметров эквивалентной электрической схемы под экспериментальные значения импеданса выполнялся при помощи открытого программного обеспечения EIS Spectrum Analyser [19]. Ингибирующая способность компонентов экстракта определялась из отношения сопротивлений переноса заряда в присутствии ( $R$ ) и отсутствии ( $R_0$ ) ингибитора:  $ЭИ = (R - R_0)/R \cdot 100\%$  [14]. Результаты показаны на рис. 3 и в табл. 2.

**Адсорбционная модель Ленгмюра.** Описание адсорбции компонентов экстракта на поверхности электрода выполнено в рамках адсорбционной модели Ленгмюра. Уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра линейаризовано в виде  $c_u/\theta = 1/K_{adc} + c_u$ , где  $c_u$  – концентрация раствора экстракта мелиссы лекарственной, г/л,  $K_{adc}$  – константа равновесия процесса адсорбции-десорбции, л/г и  $\theta$  – доля поверхности, покрытой ингибитором, которая принимается равной эффективности ингибирования. Зависимость  $c_u/\theta$  от  $c_u$  представлена на рис. 4 и в табл. 3. Данные обработаны методом наименьших квадратов, и константа равновесия процесса адсорбции-десорбции оценена, как свободный член регрессионного уравнения. Изменение энергии Гиббса процесса адсорбции оценивалось по урав-

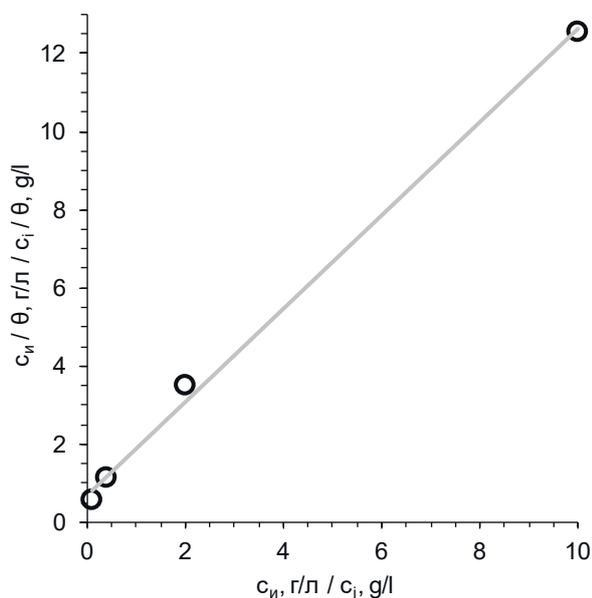


Рис. 4. Зависимость  $c_u/\theta$  от  $c_u$  для адсорбции экстракта мелиссы лекарственной на поверхности стали

Fig. 4. The dependence of  $c_u/\theta$  on  $c_u$  for the adsorption of the lemon balm extract on the steel surface

Таблица 3. Параметры адсорбционной модели Ленгмюра  
Table 3. The parameters of the Langmuir adsorption model

$c_u, \text{ г/л}$ / $c_p, \text{ g/l}$	$\theta$	$c_u/\theta, \text{ г/л}$ / $c_l/\theta, \text{ g/l}$	Уравнение регрессии / Regression equation	$K_{\text{адс}}, \text{ л/г}$ / $K_{\text{адс}}, \text{ l/g}$	$\Delta_{\text{адс}}G, \text{ кДж/моль}$ / $\Delta_{\text{адс}}G, \text{ kJ/mol}$
0,1	0,176	0,57	$c_u/\theta = (1,19 \pm 0,04) \cdot c_u + (0,7 \pm 0,2);$ $R^2 = 0,9975$	$1,4 \pm 0,4$	$-18 \pm 3$
0,4	0,357	1,12			
2	0,573	3,49			
10	0,797	12,55			

нению  $\Delta_{\text{адс}}G = -RT \ln(K_{\text{адс}} \cdot c_e)$ , где  $c_e = 10^3 \text{ г/л}$  – концентрация воды в растворах экстрактов. Результаты представлены в табл. 3.

### Обсуждение результатов

Результаты электрохимических и импедансных испытаний показывают, что добавление 100 мг компонентов экстракта Melissa лекарственной на каждый литр раствора замедляет электрохимическую коррозию стали Ст3 в 0,5 М растворе серной кислоты на ~15%. Эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ингибитора и при добавлении 10 г/л компонентов экстракта достигает ~75%.

Адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали описывается адсорбционной моделью Ленгмюра с хорошим коэффициентом достоверности аппроксимации. Вычисленная энергия Гиббса процесса адсорбции не превышает ~ -20 кДж/моль, что свидетельствует о физической природе адсорбции.

Определённые в работе эффективности ингибирования коррозии низкоуглеродистой стали в среде серной кислоты экстрактом Melissa лекарственной сравнимы со значениями его эффективностей ингибирования коррозии сталей в соляной кислоте [15-17].

В сочетании с предыдущими работами, настоящее исследование подтверждает хорошие ингибирующие свойства экстрактов Melissa лекарственной против коррозии сталей в кислых средах, хотя эффективность ингибирования будет сильно зависеть от состава среды и температуры [20]. Добавка экстрактов Melissa лекарственной в

коррозионную среду может использоваться при защите оборудования от коррозии в травильных участках производств по обработке металлов, гальванических цехах, а также входить в состав средств для удаления продуктов коррозии со стальных поверхностей [21, 22].

### Выводы

Методами электрохимической поляризации и спектроскопии исследовано ингибирующее влияние компонентов отвара Melissa лекарственной на коррозию стали Ст3 в среде 0,5 М серной кислоты. Показано, что ингибирующая эффективность возрастает с увеличением концентрации компонентов экстракта в растворе, и составляет ~15% при концентрации 100 мг/л, и ~75% при концентрации 10 г/л. Показано, что адсорбция компонентов экстракта на поверхности стали подчиняется адсорбционной модели Ленгмюра. Отвар Melissa лекарственной обладает хорошими ингибирующими свойствами против коррозии низкоуглеродистых сталей в кислых средах.

### Литература

1. Абдуллаев Т. А. Ингибитор коррозии на основе отходов производства // Практика противокоррозионной защиты, 1999. – № 1(11). – С. 24-28.
2. Брыксина В. А., Цыганкова Л. Е., АLEXINA О. В., Курьято Н. А. Противокоррозионная защита стали дротаверином в 0,5 М растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 7-16. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-1



3. Chigondo M. et al. Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview // Journal of Chemistry, 2016. – Art. 6208937. doi: 10.1155/2016/6208937
4. Raja P. B., Sethuraman M. G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review // Materials letters, 2008. – Vol. 62, No 1. – P. 113-116. doi: 10.1016/j.matlet.2007.04.079
5. Verma C. et al. An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media // Journal of molecular liquids, 2018. – Vol. 266. – P. 577-590. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.110
6. Miralrio A., Espinoza Vázquez A. Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review // Processes, 2020. – Vol. 8, No 8. – Art. 942. doi: 10.3390/pr8080942
7. Yadav M. et al. A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. – Vol. 4. – Art. 100153. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100153
8. Цыганкова Л. Е. и др. Коррозия и защита стали композициями на базе рапсового масла в атмосфере с повышенной концентрацией  $SO_2$  // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – № 1(67). С. 33-37.
9. Dastmalchi K et al. Chemical composition and in vitro antioxidative activity of a lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract // LWT-Food Science and Technology. – 2008. – Vol. 41, № 3. – P. 391-400. doi: 10.1016/j.lwt.2007.03.007
10. Miraj S., Rafieian-Kopaei, Kiani S. *Melissa officinalis* L: A Review study with an antioxidant prospective // Journal of evidence-based complementary & alternative medicine. – 2017. – Vol. 22, № 3. – P. 385-394. doi: 10.1177/2156587216663433
11. Petrisor G. et al. *Melissa officinalis*: Composition, pharmacological effects and derived release systems—A review // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23, № 7. – Art. 3591. doi: 10.3390/ijms23073591
12. Bhardwaj N., Sharma P., Kumar V. Phytochemicals as steel corrosion inhibitor: an insight into mechanism // Corrosion Reviews. – 2021. – Vol. 39, № 1. – P. 27-41. doi: 10.1515/corrrev-2020-0046
13. Popoola L. T. Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review // Corrosion Reviews. – 2019. – Vol. 37, № 2. – P. 71-102. doi: 10.1515/corrrev-2018-0058
14. Kadhim A et al. Corrosion inhibitors. A review // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2021. – Vol. 10, № 1. – P. 54-67. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-3
15. Nahle A. et al. Evaluation of *Melissa officinalis* extract and oil as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acidic chloride solutions // Oriental Journal of Chemistry. – 2016. – Vol. 32, No 4. – P. 1909-1921. doi: 10.13005/ojc/320417
16. Fouda A. S., El-Mgeed A. A., El-Salam S. A. *Melissa officinalis* aqueous plant extract as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in aqueous solutions. Der Pharma Chemica. – 2015. – Vol. 7, № 7. – P. 27-38.
17. El-Etre A. Y., Megahed H. E., Refaat S. M. Carbon steel corrosion in HCl in the presence of aqueous extract of *Melissa Officinalis*. Journal of Basic and Environmental Sciences. – 2015. – Vol. 5. – P. 52-62.
18. Yuan X. Z. et al. EIS equivalent circuits // Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications. – Berlin: Springer. – 2010. – P. 139-192. doi: 10.1007/978-1-84882-846-9\_4
19. Bondarenko A. S, Ragoisha G. A. Inverse problem in potentiodynamic electrochemical impedance spectroscopy // Progress in Chemometrics Research. – New York: Nova Science Publishers. – 2005. – P. 89-102. – The software is available online at <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>.
20. Киченко А. Б., Кушнаренко В. М. О некорректности точных значений оценки защитного действия ингибиторов коррозии // Практика противокоррозионной защиты. – 2005. – № 4(38). – С. 17-22.
21. Harvey T. J., Walsh F. C., Nahlé A. H. A review of inhibitors for the corrosion of transition metals in aqueous acids // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 266. – P. 160-175. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.014
22. Goyal M. et al. Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 256. – P. 565-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j>



molliq.2018.02.045

### References

1. Abdullaev, T. A. (1999). Inhibitor corrosion on the basis of waste products. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 1(11), 24-28. (in Russ.)
2. Bryksina, V. A., Tsygankova, L. E., Alekhina, O. V., & Kur'yato, N. A. (2023). Anticorrosive protection of steel with drotaverine in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28(2), 7-16. doi: 10.31615/j.corros.prot.2023.108.2-1 (in Russ.)
3. Chigondo, M. et al (2016). Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview. *Journal of Chemistry*, 6208937. doi: 10.1155/2016/6208937
4. Raja, P. B., Sethuraman, M. G (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media-a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116. doi: 10.1016/j.matlet.2007.04.079
5. Verma, C. et al (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. *Journal of molecular liquids*, 266, 577-590. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.110
6. Miralrio, A., Espinoza Vázquez, A (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes*, 8(8), 942. doi: 10.3390/pr8080942
7. Yadav, M. et al (2021). A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100153. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100153
8. Tsygankova, L. E. et al (2013). Corrosion and protection of steel by compositions on base of colza oil with atmosphere with heightened SO<sub>2</sub> concentration. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 1(67), 33-37. (in Russ.)
9. Dastmalchi, K et al (2008). Chemical composition and in vitro antioxidative activity of a lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract. *LWT-Food Science and Technology*, 41(3), 391-400. doi: 10.1016/j.lwt.2007.03.007
10. Miraj, S., Rafieian-Kopaei, Kiani, S. (2017). *Melissa officinalis* L: A Review study with an antioxidant prospective. *Journal of evidence-based complementary & alternative medicine*, 22(3), 385-394. doi: 10.1177/2156587216663433
11. Petrisor, G et al. (2022). *Melissa officinalis*: Composition, pharmacological effects and derived release systems-A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3591. doi: 10.3390/ijms23073591
12. Bhardwaj, N., Sharma, P., Kumar, V. (2021). Phytochemicals as steel corrosion inhibitor: an insight into mechanism. *Corrosion Reviews*, 39(1), 27-41. doi: 10.1515/correv-2020-0046
13. Popoola, L. T. (2019). Organic green corrosion inhibitors (OGCIs): a critical review. *Corrosion Reviews*, 37(2), 71-102. doi: 10.1515/correv-2018-0058
14. Kadhim, A et al (2021). Corrosion inhibitors. A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 54-67. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-1-3
15. Nahle, A., et al (2016). Evaluation of *Melissa officinalis* extract and oil as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acidic chloride solutions. *Oriental Journal of Chemistry*, 32(4), 1909-1921. doi: 10.13005/ojc/320417
16. Fouda, A. S., El-Mgeed, A. A., & El-Salam, S. A. (2015). *Melissa officinalis* aqueous plant extract as eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in aqueous solutions. *Der Pharma Chemica*, 7(7), 27-38.
17. El-Etre, A. Y., Megahed, H. E., & Refaat, S. M. (2015). Carbon steel corrosion in HCl in the presence of aqueous extract of *Melissa Officinalis*. *Journal of Basic and Environmental Sciences*, 5, 52-62.
18. Yuan, X. Z. et al (2010). EIS equivalent circuits. *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications*. Berlin: Springer, pp. 139-192. doi: 10.1007/978-1-84882-846-9\_4
19. Bondarenko, A. S, Ragoisha, G. A (2005). Inverse problem in potentiodynamic electrochemical impedance spectroscopy. *Progress in Chemometrics Research*; New York: Nova Science Publishers, pp. 89-102 (the software is available online at <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>)
20. Kichenko, A. B., Kushnarenko, V. M. (2005). Regarding the inaccuracy of the exact values of corrosion inhibitors protective effect. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 4(38), 17-22. (in Russ.)
21. Harvey, T. J., Walsh, F. C., & Nahlé, A. H. (2018). A review of inhibitors for the



corrosion of transition metals in aqueous acids. *Journal of Molecular Liquids*, 266, 160-175. doi: 10.1016/j.molliq.2018.06.014

22. Goyal, M. et al (2018). Organic corrosion

inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 565-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>

#### Информация об авторах

**Николайчук Павел Анатольевич**, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», Курганский государственный университет (КГУ), г. Курган, Российская Федерация

**Васильев Павел Андреевич**, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», КГУ, г. Курган, Российская Федерация

**Енова Юлия Андреевна**, м.н.с., научно-исследовательская лаборатория «Перспективные материалы для промышленности и биомедицины», КГУ, г. Курган, Российская Федерация

#### Information about authors

**Pavel A. Nikolaychuk**, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", Kurgan State University (KSU), Kurgan, Russian Federation

**Pavel A. Vasilyev**, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", KSU, Kurgan, Russian Federation

**Yulia A. Enova**, junior scientist, research laboratory "Advanced materials for industry and biomedicine", KSU, Kurgan, Russian Federation

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова

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

Объем издания: 15,25 п.л. (253 стр.)

Стоимость 600 рублей

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 нейтральным 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  $CO_2$ .



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4>

**Анодное поведение алюминиевого сплава AM4.5Mg1 типа дюралюмин,  
легированного празеодимом, в растворе NaCl**

**И.Н. Ганиев<sup>1</sup>✉, М.М. Саидов<sup>2</sup>, У.Н. Файзуллоев<sup>3</sup>, Х.М. Ходжаназаров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт химии имени В.И. Никитина Национальной Академии Наук Таджикистана,  
Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Садриддина Айна, д. 299/2

<sup>2</sup>Республиканский медицинский колледж,  
Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Рахмона Набиева, д. 248

<sup>3</sup>Филиал Национального исследовательского технологического университета  
«МИСИС» в г. Душанбе,  
Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе, ул. Моёншо Назаршоева, д. 7

e-mail: [ganiev48@mail.ru](mailto:ganiev48@mail.ru)

**Аннотация.** История применения алюминия для строительства летательных аппаратов своими корнями уходит в годы, предшествующие Первой мировой войне. Накануне этой войны известный немецкий конструктор граф Цеппелин разработал проект большого жёсткого дирижабля. Однако выяснилось, что сделать его каркас из дерева невозможно, поскольку он получался тяжёлым и непрочным. Лучше всего подходил алюминий, но он был слишком мягким. И вот тогда было принято принципиальное решение использовать в конструкциях воздухоплавательных средств изобретённый в 1909 г. немецким химиком Вильмом, лёгкий и прочный сплав на основе алюминия. По имени города Дюрена, где удалось наладить производство нового металла, его назвали дюралюминием или дюралем.

Дюралюминий относится к категории конструкционных сплавов, которые отличаются повышенной прочностью. Основу их составляет алюминий. В качестве добавок используют медь, марганец, магний в разных процентных соотношениях. Свойства дюралюминия зависят от термической обработки и количества добавленных легирующих элементов.

В статье приведены результаты исследования влияние празеодима на анодное поведение алюминиевого сплава AM4.5Mg1 типа дюралюмин в растворе NaCl. Исследование коррозионно-электрохимического поведения сплавов проведено в потенциодинамическом режиме со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с. Показано, что добавка празеодима снижает скорость коррозии исходного сплава AM4.5Mg1 на 20...30%. Установлено, что увеличение концентрации хлорид-иона способствует росту скорости коррозии независимо от содержания празеодима в сплаве.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав AM4.5Mg1 типа дюралюмин, потенциодинамический метод, празеодим, раствор NaCl, скорость коррозии, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования

**Для цитирования:** Ганиев И.Н., Саидов М.М., Файзуллоев У.Н., Ходжаназаров Х.М. Анодное поведение алюминиевого сплава AM4.5Mg1 типа дюралюмин, легированного празеодимом, в растворе NaCl // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 37-45. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4>

Получена 18.12.2023. Принята к публикации 20.02.2024. Опубликовано 01.03.2024.

**Anodic Behavior of Aluminum Alloy AM4.5Mg1 of the Duralumin Type,  
Alloyed with Praseodymium, in a NaCl Solution**

**Izatullo N. Ganiev<sup>1</sup>✉, Munavvarsho M. Saidov<sup>2</sup>,  
Ubaidullo N. Faizulloev<sup>3</sup>, Khairullo M. Khojanazarov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>V.I. Nikitin Chemistry Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Sadriddin Aini st., Dushanbe, 734063, Republic Tajikistan

<sup>2</sup>Republican Medical College,



248, Rakhmona Nabieva st., Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan,

<sup>3</sup>Branch of the National Research Technological University «MISIS» in Dushanbe,  
7, Nazarshoev st., Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan

e-mail: ganiev48@mail.ru

**Abstract.** The history of the use of aluminum for construction and aircraft goes back to the years before the First World War. On the eve of this war, the famous German designer Count Zeppelin developed a project for a large rigid airship. However, it turned out that it was impossible to make its frame from wood, since it turned out to be heavy and fragile. Aluminum was the best choice, but it was too soft. And then a fundamental decision was made to use duralumin, a light and durable aluminum-based alloy, invented in 1909 by the German chemist Wilm, in the designs of aeronautics. After the city of Duren, where it was possible to establish the production of the new metal, it was called duralumin or duralumin.

Duralumin belongs to the category of structural alloys, which are characterized by increased strength. They are based on aluminum. Copper, manganese, and magnesium are used as additives in different percentages. The properties of duralumin depend on the heat treatment and the amount of added alloying elements.

The article presents the results of a study of the effect of praseodymium on the anodic behavior of aluminum alloy AM4.5Mg1 of the duralumin type in a *NaCl* electrolyte environment. The study of the corrosion-electrochemical behavior of alloys was carried out by potentiodynamic mode with a potential sweep rate of 2 mV/s. It has been shown that the addition of praseodymium reduces the rate of anodic corrosion of the original alloy AM4.5Mg1 of the duralumin type by 20...30%. It has been established that an increase in the concentration of chloride ion promotes an increase in the rate of anodic corrosion, regardless of the praseodymium content in the AM4.5Mg1.

**Keywords:** aluminum alloy AM4.5Mg1 type duralumin, potentiodynamic method, praseodymium, *NaCl* solution, corrosion rate, corrosion potential, pitting potential

**For citation:** Ganiev, I. N., Saidov, M. M., Faizulloev, U. N., & Khojanazarov, Kh. M. (2024). Anodic Behavior of Aluminum Alloy AM4.5Mg1 of the Duralumin Type, Alloyed with Praseodymium, in a NaCl Solution. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 37-45. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-4>

Received December 18, 2023. Accepted for publication February 20 2024. Published March 01, 2024.

## Введение

В Российской Федерации для производства авиационной техники нашли широкое применение высокопрочные алюминиевые сплавы *Al-Zn-Mg-Cu* и сплавы средней и повышенной прочности *Al-Mg-Cu*, упрочняемые термической обработкой (ТО). Данные сплавы применяются в качестве конструкционных материалов для производства обшивки и внутреннего силового набора элементов планера самолёта. Для реализации возрастающих требований к ресурсу, надёжности и весовой эффективности конструкций необходимо осуществлять постоянное совершенствование композиций алюминиевых сплавов по легирующим элементам и примесям, технологическим процессам и параметрам производства. Особо прочный современный сплав В96ц-Зпч на основе системы *Al-Zn-Mg-Cu-Zr* (1965-1), разработанный в ВИАМ для длинномерных авиационных катаных и прессованных полуфабрикатов, предназначен для замены высокопрочного сплава В95 оч/пч, превосходя последний на 20% по пределу прочности, на 40% по

пределу текучести, существенно по удельным характеристикам прочности, что позволяет повысить весовую эффективность конструкции на 10...20% [1].

*Zn, Mg* и *Cu* образуют с *Al* и между собой твёрдые растворы и различные металлические соединения –  $MgZn_2$ ,  $S(Al_2CuMg)$ ,  $T - (Mg_4Zn_3Al_3)$ , оказывающие значительное влияние в упрочнении сплава при его ТО. В сплавах данной системы особенно важной является Т-фаза, находящаяся в равновесии с  $\alpha$ -твёрдым раствором. Марганец и хром усиливают результат старения и повышают коррозионную стойкость сплавов данного типа. Кроме того, марганец способствует получению мелкозернистой структуры, затрудняет выделение интерметаллических фаз по границам зерен  $\alpha$ -твёрдого раствора, незначительно повышает прочность сплава.

Сплав В96ц-Зпч является высоколегированным сплавом (сумма главных компонентов *Zn, Mg, Cu* может достигнуть 12,5 % по массе), он не прост при освоении полуфабрикатов в металлургическом производстве, начиная от отливки

и гомогенизации крупногабаритных плоских слитков и заканчивая новыми многоступенчатыми режимами искусственного старения полуфабрикатов [1, 2].

Одним из основных конструкционных металлических материалов в авиастроении считается сплав 1163. В отличие от других сплавов системы *Al-Cu-Mg*, сплав 1163 обладает более высокой вязкостью разрушения и повышенной выносливостью, что способствует его широкому применению в производстве элементов конструкций самолётов, работающих в режимах критических усталостных нагрузок [3, 4].

Дюраль (*Al-Cu*) – сокращение от дюралюмин, группа высокопрочных сплавов на основе алюминия 93,5%, с добавками меди 4,5%, магния 1,5% и марганца 0,5%. Плотность сплава – 2500...2800 кг/м<sup>3</sup>. Температура плавления дюралюмина – 650 °С. При испытаниях на растяжение типовое значение предела текучести составляет 250 МПа, предела кратковременной прочности 400...500 МПа. Прочностные характеристики зависят от состава и термообработки. Массовая плотность – 2,79 г/см<sup>3</sup>, интервал температуры плавления 510...640 °С. Линейный коэффициент термического расширения –  $23,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ . Модуль упругости – 74 000 МПа. Теплопроводность – состояние Т4: 134 W/М°С, удельная теплоёмкость 920 Дж/кг°С [5-9].

Прутки используют в строительной сфере и машиностроении. Прокат применяется как сырьё для изготовления деталей и механизмов. Дюралюмин – немагнитный сплав, легок и пластичен, с повышенной электропроводностью. Прокат способен сохранять эксплуатационные характеристики при температурных колебаниях, эти достоинства делают прокат востребованным на производствах. Лента применяется в строительстве жилых и нежилых объектов недвижимости, при отделочных работах и в декоре помещений. Прокат применим как элемент герметизации и соединения швов, популярен в промышленности пищевого направления.

При производстве малогабаритных деталей и сборных конструкций используется проволока. Проволокой пользуются в отраслях промышленности, продукция

востребована в машиностроении и мебельной индустрии. Используется как универсальная основа для креплений, применяется при изготовлении элементов декора и фурнитуры для мебели, заклепок, пружин, сеток и т.д. Для изготовления легких, но в то же время прочных сооружений, возведения фасадов, изготовления элементов декоративной отделки и оборудования для пищевого блока используются трубы. Они применимы при прокладке специализированных трубопроводных систем. Прокат податлив к механической обработке и сварке точечным способом. Благодаря лакировке маркой чистого алюминия, повышается уровень коррозионной стойкости. Чтобы увеличить прочность, применяют термическую обработку [10, 11].

Целью настоящей работы является исследование влияния добавки празеодима на коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 типа дюралюмин.

#### **Экспериментальная часть**

Сплавы для исследования получали из алюминия марки А6 (ГОСТ 11069), меди марки М1к (99,95% *Cu*) ГОСТ 859-2014, магния Мг90 (99,9% *Mg*) ГОСТ 804-93), празеодима металлического (ГОСТ 23862.0-79). В шахтных лабораторных печах типа СШОЛ предварительно синтезировали лигатуры алюминия с 10 мас.% празеодима. Шихтовку сплавов проводили с учётом угля празеодима и магния. Исследованиям подвергали сплавы, масса которых отличалась от массы шихты не более, чем на 2%. В графитовой изложнице из полученных сплавов отливали цилиндрические образцы диаметром 8 мм, длиной 140 мм для исследования коррозионных свойств. Торцевая часть образцов служила рабочим электродом.

Электрохимические исследования проводились потенциодинамическим методом с использованием потенциостата ПИ-50.1.1, программатора ПР-8 и двухкоординатного регистратора ЛКД-4. Скорость развёртки потенциала равнялась 2 мВ/с. Исследования проводили в нейтральном растворе *NaCl*. Образцы сплавов перед началом электрохимических измерений вы-

держивались до достижения стационарного потенциала или потенциала коррозии  $E_{кор}$ , значения которого устанавливалось по зависимости «потенциал ( $E$ , В) – время ( $t$ , мин.)» в течение 1-го часа выдержки в растворе хлорида натрия. Установившееся значение  $E_{кор}$  сплавов подтверждается более длительной выдержкой в течение 1...3 сут.

При электрохимических исследованиях образцы поляризовали в положительном направлении от установившегося начального потенциала  $E_{кор1}$  до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока до 1 А/м<sup>2</sup>. Образцы далее поляризовали в обратном направлении (до значения потенциала –1,2 В), что позволило подщелачивать приэлектродную поверхность образца и снять оксидную плёнку с его поверхности. Далее образцы снова поляризовали в положительном направлении от установившегося потенциала коррозии  $E_{кор4}$ . При таком переходе фиксируется потенциал питтингообразования ( $E_{n.o.}$ ).

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

–  $E_{кор}$  – потенциал коррозии;

–  $E_{n.o.}$  – потенциал питтингообразования;  
–  $E_{p.n.}$  – потенциал репассивации;  
–  $i_{кор}$  – ток коррозии.

Процесс коррозии алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 контролировался катодной реакцией ионизации кислорода в нейтральной среде, в связи с чем ток коррозии рассчитывался с учетом тафелевской константы ( $b_k = 0,122$  В) из катодной ветви потенциодинамических кривых. Скорость коррозии, являющаяся функцией тока коррозии, определялась по формуле:

$$K = i_{кор} \cdot \kappa,$$

где  $\kappa$  – электрохимический эквивалент алюминия, среднее значение которого составляет 0,335 г/А·ч. В работах [12-15] описана подробная методика исследования коррозионно-электрохимического поведения сплавов.

Результаты электрохимических исследований легированного празеодимом алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 представлены на рис. 1-3 и в табл.1, 2. Из рис. 1 и табл. 1 вытекает, что по мере разбавления электролита NaCl,  $E_{кор}$  смещается в область положительных значений, особенно в первые 5...10 минут от начала погруже-

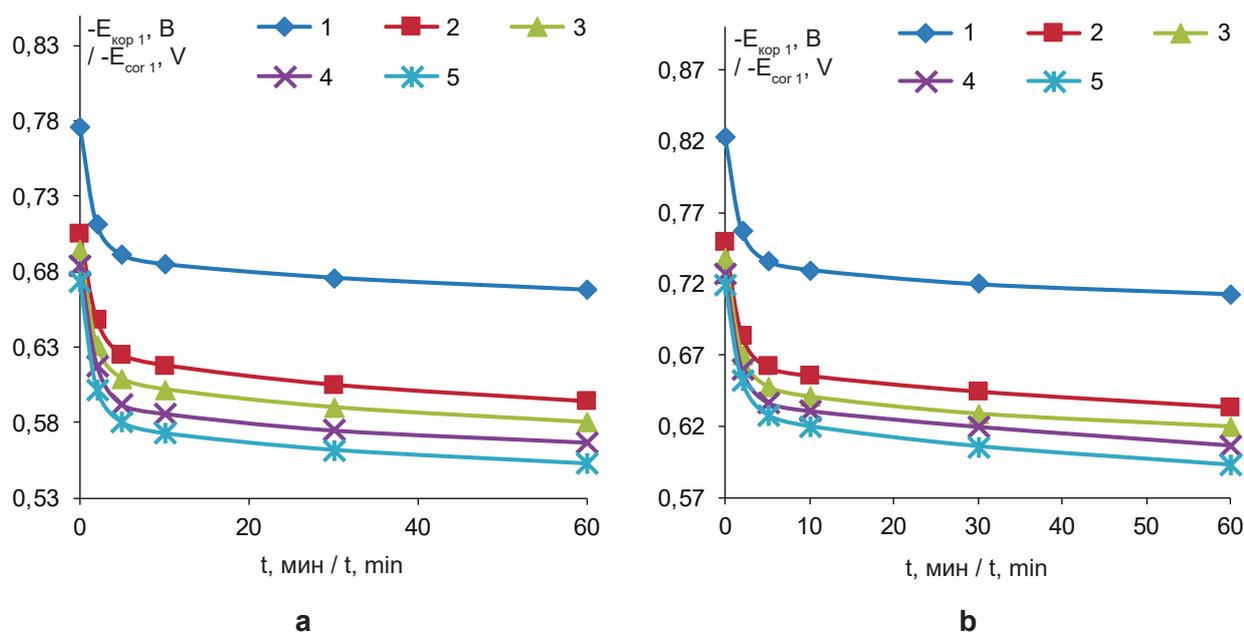


Рис. 1. Временная зависимость  $-E_{кор1}$  алюминиевого сплава АМ4.5Мг1 (1) с празеодимом, мас. %: 0,05 (2); 0,1 (3); 0,5 (4); 1,0 (5), в 0,03 % (а) и 0,3% NaCl (б)

Fig.1. Time dependence  $-E_{кор1}$  of aluminum alloy АМ4.5Мг1 (1) type duralumin with praseodymium, wt. %: 0,05(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5) in 0,03% (a) and 0,3% NaCl solution (b)

Таблица 1. Временная зависимость потенциала коррозии ( $-E_{кор1}$ , В) (х.с.э.) алюминиевого сплава AM4.5Mg1 от содержания празеодима в 3,0% NaCl

Table 1. Time dependence of the corrosion potential (s.c.e.) ( $-E_{cor1}$ , V) of the aluminum alloy AM4.5Mg1 of the duralumin type on the praseodymium content in 3,0% NaCl solution

Время выдержки, мин / Exposure time, min	Содержание празеодима в сплаве, мас. % / Praseodymium content in the alloy, wt. %				
	0,0	0,05	0,1	0,5	1,0
0	0,873	0,803	0,786	0,775	0,762
0,15	0,860	0,791	0,775	0,763	0,750
0,2	0,849	0,780	0,764	0,752	0,738
0,3	0,838	0,769	0,754	0,741	0,727
0,4	0,828	0,758	0,745	0,730	0,716
0,5	0,819	0,748	0,736	0,721	0,706
0,6	0,810	0,739	0,727	0,712	0,697
2	0,802	0,730	0,718	0,703	0,688
3	0,794	0,721	0,710	0,694	0,681
4	0,787	0,714	0,702	0,687	0,674
5	0,780	0,707	0,694	0,680	0,667
10	0,774	0,701	0,687	0,674	0,661
20	0,768	0,695	0,680	0,669	0,655
30	0,763	0,690	0,674	0,664	0,650
40	0,759	0,686	0,669	0,659	0,646
50	0,757	0,682	0,666	0,655	0,643
60	0,757	0,680	0,666	0,653	0,640

ния электрода в раствор. Стабилизация  $E_{кор}$  происходит после 20...40 минут от начала погружения электрода в раствор. Данная зависимость свидетельствует о пассивации поверхности образца в результате формирования защитной оксидной плёнки. Например, после одного часа выдержки в 0,03% NaCl,  $E_{кор}$  нелегированного сплава составляет -0,757 В, а у сплава, содержащего 1,0 мас. % празеодима,  $E_{кор}$  равняется -0,640 В.

Анодное поведение алюминиевого сплава AM4.5Mg1 с празеодимом исследовалось в среде с различной концентрацией NaCl. Результаты исследования сплавов представлены в табл. 2. Как показывают результаты исследования, с ростом концентрации хлорид-иона в электролите NaCl  $E_{кор}$  и  $E_{н.о.}$  легированных сплавов уменьшаются. Это указывает на снижение устойчивости сплавов при воздействии на них хлорид-иона.

Легирование празеодимом до 1,0 мас.% сплава AM4.5Mg1 снижает скорость его коррозии примерно на 30 %. Такое влияние празеодима на скорость коррозии исходного сплава характерно для трёх исследованных сред NaCl. Рост концентрации хлорид-иона приводит к увеличению скорости коррозии сплавов (табл. 2). Торможение процесса анодного растворения сплава AM4.5Mg1 с празеодимом вызывает уменьшение скорости его коррозии. Пассивная оксидная плёнка на алюминии разрушается в нейтральных растворах в присутствии иона хлора. В результате этого возникает питтинговая коррозия.

На рис. 2 представлен графическая зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава AM4.5Mg1 от содержания празеодима в нем в растворе NaCl различной концентрации. Добавки празеодима во всех изученных средах способствуют снижению скорости коррозии исходного алюминиевого сплава.

Таблица 2. Коррозионно-электрохимические характеристики алюминиевого сплава AM4.5Mg1 с празеодимом в среде NaCl

Table 2. Corrosion-electrochemical characteristics of aluminum alloy AM4.5Mg1 with praseodymium in NaCl environment

Среда NaCl / NaCl medium	Содержание празеодима в сплаве / Praseodymium content in alloy  мас. % / wt. %	Электрохимические потенциалы, В (х.с.э.) / Electrochemical potentials, V (s.c.e.)				Скорость коррозии / Corrosion rate	
		$-E_{кор1}$ / $-E_{cor1}$	$-E_{кор4}$ / $-E_{cor4}$	$-E_{н.о.}$ / $-E_{p.f.}$	$-E_{рн.}$ / $-E_{rp}$	$i_{кор} \cdot 10^2, A/m^2$ / $i_{cor} \cdot 10^2, A/m^2$	$K \cdot 10^3, г/м^2 \cdot ч$ / $K \cdot 10^3, g/m^2 \cdot h$
0,03	0,0	0,668	1,090	0,602	0,680	4,6	15,41
	0,05	0,594	0,997	0,528	0,609	3,6	12,06
	0,1	0,580	0,988	0,519	0,600	3,4	11,39
	0,5	0,567	0,979	0,509	0,591	3,2	10,72
	1,0	0,553	0,970	0,500	0,580	3,0	10,05
0,3	0,0	0,713	1,121	0,640	0,711	5,1	17,08
	0,05	0,634	1,037	0,548	0,636	4,1	13,73
	0,1	0,620	1,028	0,539	0,627	3,9	13,06
	0,5	0,607	1,019	0,530	0,618	3,7	12,39
	1,0	0,593	1,010	0,520	0,609	3,5	11,72
3,0	0,0	0,757	1,165	0,685	0,730	5,6	18,76
	0,05	0,680	1,082	0,600	0,644	4,6	15,41
	0,1	0,666	1,072	0,592	0,634	4,4	14,74
	0,5	0,653	1,061	0,581	0,625	4,2	14,07
	1,0	0,640	1,052	0,570	0,615	4,0	13,40

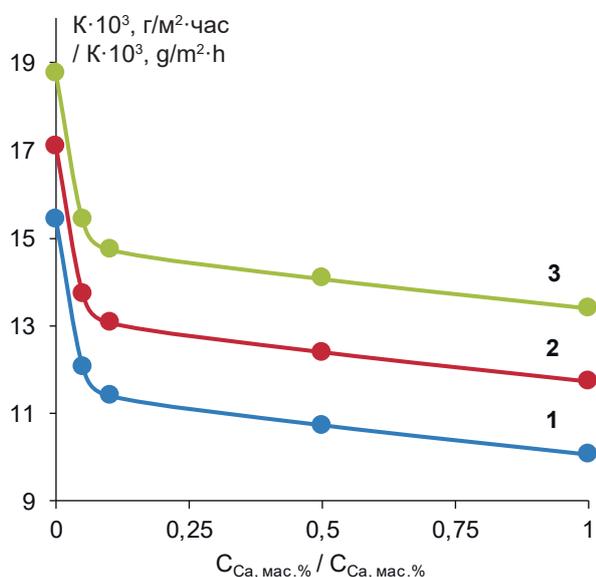
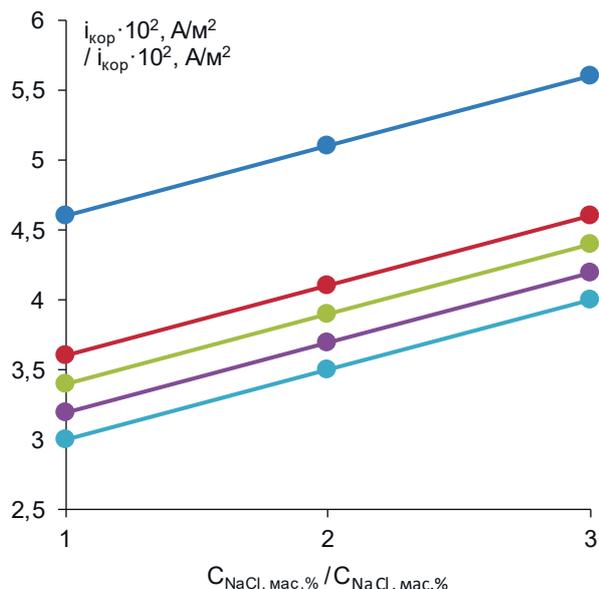


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии алюминиевого сплава AM4.5Mg1 (1) от содержания празеодима, мас. %: 0,03% (1), 0,3% (2) и 3,0% (3) растворы NaCl

Fig. 2. Dependence of the corrosion rate of aluminum alloy AM4.5Mg1 (1) on praseodymium content, wt. %: 0,03% (1), 0,3% (2) and 3,0% (3) NaCl solutions



**Рис. 3. Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого сплава AM4.5Mg1 (1) с празеодимом, мас. %: 0,05 (2); 0,1 (3); 0,5 (4); 1,0 (5) от концентрации NaCl**

**Fig. 3. Dependence of the corrosion current density of aluminum alloy AM4.5Mg1 (1) with praseodymium, wt. %: 0,05 (2); 0,1 (3); 0,5 (4); 1,0 (5) from NaCl concentration**

Зависимость плотности тока коррозии алюминиевого сплава AM4.5Mg1 с празеодимом показана на рис. 3. Легирование празеодимом снижает величину плотности тока коррозии исходного алюминиевого сплава AM4.5Mg1. С ростом концентрации хлорид-иона в растворе NaCl наблюдается рост плотности тока коррозии сплавов независимо от содержания празеодима в них.

### Заключение

Представлены обобщённые результаты исследования анодного поведения алюминиевого сплава AM4.5Mg1 с празеодимом. С ростом концентрации празеодима в сплаве AM4.5Mg1 потенциал коррозии смещается в положительном направлении. При увеличении концентрации NaCl наблюдается уменьшение его величины независимо от содержания легирующего компонента. Рост концентрации легирующего компонента способствует увеличению величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах

независимо от концентрации электролита NaCl.

С ростом концентрации раствора NaCl увеличивается плотность тока коррозии и, соответственно, скорость коррозии алюминиевого сплава AM4.5Mg1 с празеодимом и уменьшаются потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов.

Таким образом, установлено, что анодная устойчивость повышается на 20...30%, при легировании празеодимом до 1,0 мас. % алюминиевого сплава AM4.5Mg1 в среде NaCl.

### Литература

1. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение Справочник / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов; Под общ. ред. акад. И.Н. Фридляндера. – Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
2. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и терм. обр. металлов. – 2002. – № 7. – С. 24-29.
3. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. и др. // Труды 7-ой Международной конференции по алюминиевым сплавам (ICAA-7). – 2000. – Т. 3. – С. 1393-1397.
4. Антипов В.В., Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Сенаторова О.Г. Опыт применения Al-Li-сплава 1441 и слоистых материалов на его основе в гидросамолетах // Цветные металлы. – 2013. – № 9. – С. 46-50.
5. Прач Е.Л., Михаленков К.В. Разработка нового литейного сплава системы Al-Mg-Si-Mn с добавкой Li // Литейное производство. – 2014. – № 7. – С. 13-15.
6. Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., and Xiuyan G. Effects of Rare Earth Ce on Casting Properties of Al-4.5Cu Alloy, Adv // Mater. Res. – 2010. – V. 136. – P. 1-4.
7. Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K. and Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy // Transactions of The Indian Institute of Metals. – 2009. – Vol. 62, Issue 6. – P. 539-543.
8. J. Gröbner, D. Mirkovic, and R. Schmid-Fetzer, Thermodynamic Aspects of the Constitution, Grain Refining, and Solidification



Enthalpies of Al-Ce-Si Alloys // Metall. Mater. Trans. A. – 2004. – V. 35. – P. 33-49.

9. Шеметев Г.Ф., Аллюминиевые сплавы: составы, свойства, применение. Учебное пособие по курсу «Производство отливок из сплавов цветных металлов». Часть I (Электронный ресурс). Санкт-Петербург, 2012. – 155 с.

10. Шевченко А.А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии. М.: Колос, 2006. – 248 с.

11. Ганиев И.Н., Абулаков А.П., Джайлоев Дж.Х., Алиев Ф.А., Рашидов А.Р. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi («АЛДРЕЙ») с оловом в среде электролита NaCl. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – Т. 22. – № 2. – С. 128-134.

12. Ганиев И.Н., Зокиров Ф.Ш., Сангов М.М., Бердиев А.Э. Кинетика окисления алюминиевого сплава АК12М2, модифицированного барием в твёрдом состоянии // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – № 55 (81). – С. 28-33.

13. Ганиев И.Н., Абулаков А.П., Джайлоев Дж.Х., Ганиева Н.И., Якубов У.Ш. Влияние добавок свинца на анодное поведение проводникового алюминиевого сплава E-AlMgSi («АЛДРЕЙ») в среде электролита NaCl // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020. – № 2. – С. 109-113.

14. Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Назарова М.Т., Курбонова М.З. Влияние добавок калия на температурную зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2019. – Т. 75, № 4. – С. 16-22.

15. Ганиев И.Н., Саидова Ф.Р., Худойбердизода С.У., Савдуллоева С.С., Джайлоев Дж.Х., Абулхаев В.Д. Анодное поведение алюминиевого сплава AlMg5.5Li2.1Zr0.15 легированного кальцием в среде электролита NaCl // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2023. – № 2. – С. 37-41.

## References

1. Beletsky, V. M. (2005). *Aluminum alloys. Composition, properties, technology, application*. Handbook. V.M. Beletsky, G.A. Krivov; Under general ed. acad. I.N. Fridlyander. Kyiv: KOMINTEKH. (in Russ.)

2. Fridlyander, I. N. (2002). Modern aluminum, magnesium alloys and composite materials based on them. *Metal Science and Therm. arr. Metals*, (7), 24-29. (in Russ.)

3. Fridlyander, I.N., Kolobnev, N. I., & Khokhlatova, L. B. et al. (2000). *Proceedings of the 7th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-7)*, 3, 1393-1397. (in Russ.)

4. Antipov, V. V., Lavro, N. A., Sukhoivanenko, V. V., & Senatorova, O. G. (2013). Experience in using Al-Li alloy 1441 and layered materials based on it in seaplanes. *Non-ferrous metals*, (9), 46-50. (in Russ.)

5. Prach, E. L., Mikhalekov, K. V. (2014). Development of a new cast alloy of the Al-Mg-Si-Mn system with the addition of Li. *Foundry production*, (7), 13-15. (in Russ.)

6. Shikun, X., Rongx, I. Y., Zhi, G., Xiang, X., Chagen, H., and Xiuyan, G. (2010). Effects of Rare Earth Ce on Casting Properties of Al-4.5Cu Alloy, *Adv. Mater. Res.*, 136, 1-4.

7. Chaubey, A. K., Mohapatra, S., Jayasankar, K., Pradhan, S. K., Satpati, B., Sahay, S. S., Mishra, B. K. and Mukherjee, P. S. (2009). Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62(6), 539-543.

8. J. Gröbner, D. Mirkovic, and R. Schmid-Fetzer. (2004). Thermodynamic Aspects of the Constitution, Grain Refining, and Solidification Enthalpies of Al-Ce-Si Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, 35, 33-49.

9. Shemetev, G. F. (2012). *Aluminum alloys: compositions, properties, application*. Textbook for the course "Production of castings from non-ferrous metal alloys." Part I (Electronic resource). St. Petersburg. (in Russ.)

10. Shevchenko, A. A. (2006). *Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection*. Moscow: Kolos. (in Russ.)

11. Ganiev, I. N., Abulakov, A. P., Dzhayloev, J. H., Aliev, F. A., & Rashidov, A. R. (2019). Corrosion-electrochemical behavior of aluminum conductor alloy E-AlMgSi («ALDREY») with tin in a NaCl electrolyte environment. News



of higher educational institutions. *Electronic materials*, 22(2), 128-134. (in Russ.)

12. Ganiev, I., N., Zokirov, F. Sh., Sangov, M. M., & Berdiev, A. E. (2020). Kinetics of oxidation of aluminum alloy AK12M2 modified with barium in the solid state. *News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. (55), 28-33. (in Russ.)

13. Ganiev, I. N., Abulakov, A. P., Dzhayloev, J. H., Ganieva, N. I., & Yakubov, U. Sh. (2020). The influence of lead additives on the anodic behavior of the conductive aluminum alloy E-AlMgSi ("ALDREY") in the NaCl electrolyte. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences*, (2). 109-113. (in Russ.)

14. Ganiev, I. N., Yakubov, U. Sh., Nazarova, M. T., & Kurbonova, M. Z. (2019). The influence of potassium additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the AB1 aluminum alloy. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after. A.N. Tupolev*. 75(4), 16-22. (in Russ.)

15. Ganiev, I. N., Saidova, F. R., Khudoiberdizoda, S. U., Savdulloeva, S. S., Dzhayloev, J. H., & Abulkhaev, V. D. (2023). Anodic behavior of aluminum alloy AlMg5.5Li2.1Zr0.15 alloyed with calcium in NaCl electrolyte. *News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, (2), 37-41. (in Russ.)

#### Информация об авторах

**Ганиев Изатулло Наврузович**, академик НАН Таджикистана, д.х.н., профессор, зав. лабораторией, Институт химии имени В.И. Никитина Национальной Академии Наук Таджикистана, г. Душанбе, Республика Таджикистан

**Саидов Мунавваршо Мирзоалиевич**, ассистент, кафедра естественных наук и математики, Республиканский медицинский колледж, г. Душанбе, Республика Таджикистан

**Файзуллоев Убайдулло Нарзуллоевич**, к.т.н., ст. преподаватель, Филиал Национального исследовательского технологического университета (НИТУ) «МИСИС» в городе Душанбе, г. Душанбе, Республика Таджикистан

**Ходжаназаров Хайрулло Махмудхонович**, н.с., Институт химии имени В.И. Никитина НАНТ, г. Душанбе, Республика Таджикистан

#### Information about authors

**Izatullo N. Ganiev**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Head of Laboratory, V.I. Nikitin Chemistry Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Munavvarsho M. Saidov**, assistant, Department of Natural Sciences and Mathematics, Republican Medical College, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Ubaidullo N. Fayzulloev**, Ph.D. in Technical Sciences, Senior lecturer, Branch of the National Research Technological University (NUST) «MISIS» in Dushanbe, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Khairullo M. Khojanazarov**, Ph.D. in Technical Sciences, researcher, V.I. Nikitin Chemistry Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

### Уважаемые коллеги!

С 15 по 17 мая 2024 года в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ) пройдет **IV Международная конференция «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли. Коррозия»**.

Приглашаем вас принять участие в деловой программе мероприятия в качестве спикеров и слушателей.

Мероприятие нацелено на организацию взаимодействия научного и производственного сообществ. Ведущие специалисты в области материалов и технологий для нефтегазовой отрасли, машиностроения и энергетики встретятся для обсуждения актуальных проблем отрасли.

#### Контакты:

Организационный комитет конференции

Екатерина Чупрова (Специалист, НТК «Новые технологии и материалы», СПбПУ)

E-mail: chuprova\_eo@spbstu.ru

Тел.: +7 953 370 16 40



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ  
ЗАЩИТЫ**

Тип статьи: научная, оригинальная

**MATERIALS AND EQUIPMENT  
FOR CORROSION PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-5>

**Масляные композиции с парафином и присадкой М-531  
для защиты меди от атмосферной коррозии**

Л.Г. Князева<sup>1</sup>, Н.А. Курьято<sup>1</sup>, А.В. Дорохов<sup>1</sup>, В.А. Брыксина<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве,  
РФ, 392022, г. Тамбов, пер. Ново-Рубежный, д. 28

<sup>2</sup>Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
РФ, 392008, г. Тамбов, Комсомольская площадь, д. 5

e-mail: victoria\_98.bryksina@mail.ru

**Аннотация.** Ингибированные масляные композиции широко используют для противокоррозионной защиты металлов от атмосферной коррозии.

В работе исследовали композиции на основе индустриального И20-А, моторного М10Г2к, свежего и отработанного (ММО), масел с добавлением импортного комбинированного ингибитора коррозии М-531, а также отечественного парафина П-2 в количестве 3...10 мас. % для защиты меди. Кинематическую вязкость измеряли по методу Брукфильда на ротационном вискозиметре, краевые углы смачивания – на приборе Easy Drop.

Поляризационные измерения проводили с использованием потенциостата IPC-Pro MF в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 0,66 мВ/с в растворе 0,5 М NaCl. Были получены эмпирические уравнения, представляющие собой частный случай уравнения Рейнольдса – Филонова, описывающие вязкостно-температурные зависимости для масляных композиций с высокой достоверностью линейной аппроксимации в диапазоне температур 20...60 °С. Исследование краевых углов смачивания показало, что вода активно смачивает исследуемые масляные покрытия. Максимальные значения краевых углов смачивания водой масляных покрытий были достигнуты через 1 сутки. Защитные покрытия на металле формировали в течение суток. По данным электрохимических исследований использование комбинированного импортного ингибитора коррозии М-531 и отечественного парафина П-2 в масляных композициях для противокоррозионной защиты меди одинаково эффективно при концентрации 10 мас. %.

Таким образом, показана принципиальная возможность конкурирования отечественного парафина П-2 как контактной присадки с импортной комбинированной присадкой М-531.

**Ключевые слова:** коррозия, масла, комбинированный ингибитор, вязкость, краевые углы смачивания, медь

**Для цитирования:** Князева Л.Г., Курьято Н.А., Дорохов А.В., Брыксина В.А. Масляные композиции с парафином и присадкой М-531 для защиты меди от атмосферной коррозии // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 46-57. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-5>

Получена 09.10.2023. Принята к публикации 30.01.2024. Опубликовано 01.03.2024.

**Oil Compositions with Paraffin and Additive M-531  
to Protect Copper from Atmospheric Corrosion**

Larisa G. Knyazeva<sup>1</sup>, Nikolay A. Kur'yato<sup>1</sup>, Andrey V. Dorokhov<sup>1</sup>, Victoria A. Bryksina<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute for Use Machinery and Petroleum Products in Agriculture,  
28, Novo-Rubezhny lane, Tambov, 392022, Russian Federation

<sup>2</sup>Derzhavin State University,  
5, Komsomolskaya square, Tambov, 392008, Russian Federation

e-mail: victoria\_98.bryksina@mail.ru

**Abstract.** Inhibited oil compositions are widely used for anticorrosion protection of metals from atmospheric corrosion.

Compositions based on industrial I20-A, motor M10G2k, fresh and waste (WMO), oils with the addition of an

imported combined corrosion inhibitor M-531, as well as domestic P-2 paraffin in an amount of 3...10 wt. % for the protection of copper was investigated in the work. The kinematic viscosity was measured by the Brookfield method on a rotational viscometer, the contact angles were measured on an Easy Drop device.

Polarization measurements were carried out using an IPC-Pro MF potentiostat in the potentiodynamic mode with a potential sweep rate of 0.66 mV/s in a 0.5 M NaCl solution. Empirical equations were obtained, which are a special case of the Reynolds-Filonov equation, describing the viscosity-temperature dependences for oil compositions with a high reliability of linear approximation in the temperature range of 20...60 °C. The study of the contact angles of wetting showed that water actively wets the studied oil coatings. The maximum values of the contact angles of wetting with water of oil coatings were reached after 1 day. Protective coatings on the metal were formed during the day. According to electrochemical studies, the use of a combined imported corrosion inhibitor M-531 and domestic paraffin P-2 in oil compositions for anticorrosive protection of copper is equally effective at a concentration of 10 wt.%.

Thus, the fundamental possibility of competing the domestic P-2 paraffin as a contact additive with the imported combined additive M-531 is shown.

**Keywords:** corrosion, oils, combined inhibitor, viscosity, contact angles, copper

**For citation:** Knyazeva, L. G., Kuriato, N. A., Dorokhov, A. V. & Bryksina, V. A. (2024). Oil Compositions with Paraffin and Additive M-531 to Protect Copper from Atmospheric Corrosion. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(1), 46-57. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-5>

Received October 09, 2023. Accepted for publication January 30, 2024. Published March 01, 2024.

### Введение

Медь и ее сплавы находят широкое применение в промышленном и сельскохозяйственном производстве, благодаря высокой электро- и теплопроводности, коррозионной стойкости, легкости механической обработки и пайки. Хотя в атмосферных условиях медь и ее сплавы отличаются достаточно высокой коррозионной стойкостью из-за образования защитных пленок из оксидов меди на их поверхности, под действием всевозможных стимуляторов коррозии (СК), присутствующих в воздухе, и температуры они также подвергаются коррозионному разрушению.

При воздействии воздуха с фоновыми концентрациями СК, как указывают авторы работы [1], средняя величина скорости общей коррозии меди составляет  $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$  мм/г, а сама коррозия носит равномерный характер.

Зарубежные авторы часто связывают скорость атмосферной коррозии меди с концентрацией СК через уравнения ФДО (функция доза-ответ) [2]. В ранних работах предлагались простые линейные зависимости ФДО типа:

$$\Delta m = a + b \cdot C(CK),$$

где  $\Delta m$  – потери массы;

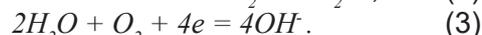
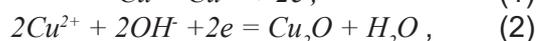
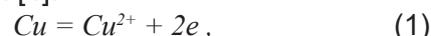
$a$  и  $b$  – константы;

$C(CK)$  – равновесная концентрация в воздухе одного СК. Вначале в качестве СК рассматривали оксид серы (IV) (мкг/м<sup>3</sup>). Затем в этих зависимостях стали учитывать влияние концентрации ионов хлора, относительного

времени увлажнения поверхности (годовая суммарная длительность воздействия на металл воздуха с относительной влажностью  $H > 80\%$  при температуре  $> 0$  °C), количество осадков (мм/год) и т. п. Можно отметить, что повышенные концентрации NaCl наблюдаются, например, в воздушной атмосфере регионов с морским климатом. С коррозией меди в среде хлорида натрия сталкиваются при эксплуатации морских судов, перевозках оборудования и металлоизделий морским путем.

В работе [3] показано изменение скорости коррозии (K) меди в атмосфере со 100 %-ной влажностью при комнатной температуре (рис. 1).

В начальный момент скорость коррозии на меди и ее сплавов падает из-за образования защитных пленок из продуктов коррозии, природа которых зависит от присутствующих в атмосфере СК. Почти всегда при соприкосновении поверхности меди с водой или разбавленными растворами в результате протекания анодных (1, 2) и катодной (3) реакций образуются слои куприта  $Cu_2O$ , обладающего хорошими защитными свойствами, толщиной от мономолекулярного до 10 нм [1]:



Кристаллическая решетка куприта незначительно отличается от кристаллической решетки меди. Кислород внедряется, из-

меняя параметры её единичной ячейки от 0,36 до 0,425 нм (~ 18 %) [1]. Существует предположение, что после того, как куприт в первых 10 молекулярных слоях пленки перейдет в тенорит ( $CuO$ ), скорость коррозии будет определяться диффузией ионов меди через эту пленку [1].

Присутствие во влажном воздухе углекислого газа приводит к образованию на поверхности малахита ( $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ ). Сульфиды, хлориды, находящиеся в воздухе, разрушают малахит, ускоряя атмосферную коррозию меди и ее сплавов [4].

Наиболее проста и эффективна ингибиторная защита меди от атмосферной коррозии. При транспортировке медных изделий в экстремальных климатических условиях в качестве ингибитора коррозии (ИК) широко используют композиции азолов в воде или органических растворителях. Так, например, уже при погружении меди в любую композицию с бензотриазолом происходит мгновенная пассивация меди [5, 6]. Однако бензотриазол, как большинство азолов, достаточно токсичен, что ограничивает возможность его использования. Установлено, что для этих целей подходят различные менее токсичные амины и производные синтетических жирных кислот [4, 7-12].

Для временной противокоррозионной защиты меди от атмосферной коррозии

успешно применяются ингибированные масляные композиции [9-12]. Их преимущества – в технической простоте приготовления, легкости нанесения, эффективности действия.

Чаще всего для этих целей используют нефтяные масла, представляющие собой смеси высокомолекулярных углеводородов различных классов [13,14]; циклических нафтенов; моно-, ди-, трициклических ароматических углеводородов с нафтеновыми кольцами; полициклических ароматических соединений с большим числом колец; парафиновых цепей; изопарафинов. В товарных нефтяных маслах, кроме того, имеются многочисленные функциональные заводские присадки – антиокислительные, ингибирующие, пластифицирующие, модифицирующие и др., как правило, представляющие собой поверхностно активные вещества (ПАВ) [14, 15]. Их качественный и количественный состав может существенно различаться, влияя на их адсорбционную способность из масляных пленок и противокоррозионную эффективность масел. Нефтяные масла сами по себе обладают недостаточной защитной эффективностью, даже отработанные [16-18].

Маслорастворимые ингибиторы коррозии полностью растворяются в маслах за счет углеводородной части молекулы и уси-

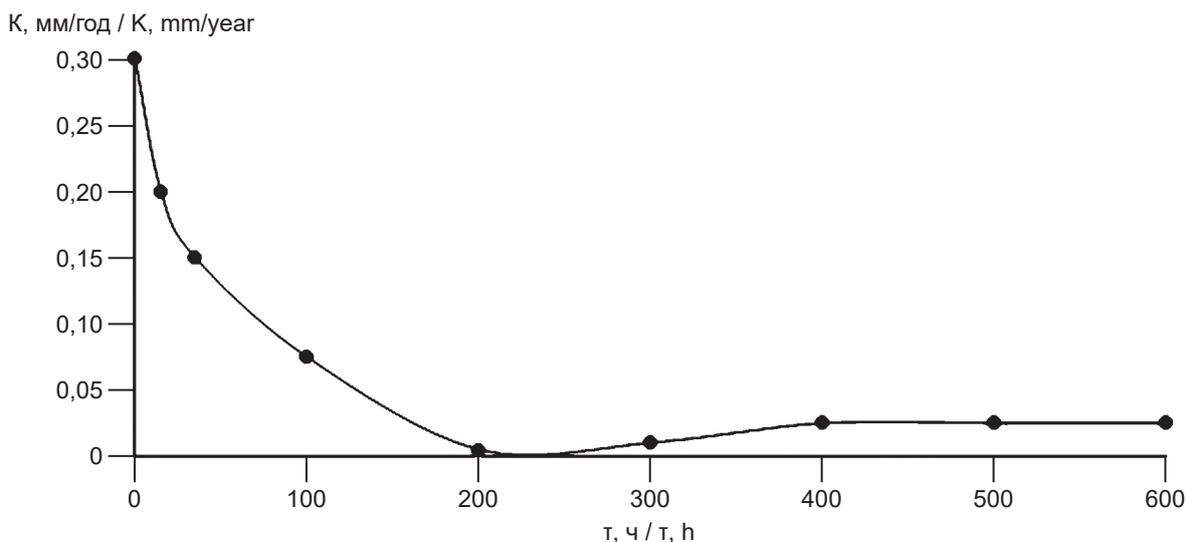


Рис. 1. Скорость коррозии меди М1 в 0,1 М растворе NaCl в условиях 100%-ной влажности при комнатной температуре

Fig. 1. Corrosion rate of copper M1 in 0,1 M NaCl solution under conditions of 100% humidity at room temperature

ливают их противокоррозионные свойства, образуя хемосорбционные и адсорбционные пленки на металле [1, 2]. Еще большего эффекта можно ожидать от комбинированных материалов, которые, помимо маслорастворимого компонента, содержат еще и летучий ингибитор коррозии, благодаря которому осуществляется противокоррозионная защита в труднодоступных местах.

Целью данной работы является изучение вязкостно-температурных свойств и противокоррозионной эффективности на меди масляных композиций с импортным комбинированным ингибитором коррозии М-531 и отечественным парафином П-2.

### Методики экспериментов

В работе использованы нефтяные масла: моторное М10Г2к товарное и отработанное (ММО), индустриальное И20-А (ГОСТ 20799-88) и ингибиторы коррозии (ИК): импортная комбинированная противокоррозионная добавка М-531 (производитель компания Cortec Corporation, USA, на территории России официальным представителем компании является общество ООО «Кортек Рус»), а также парафин П-2 отечественного производства в количестве 3...10 мас. %.

Некоторые физико-химические характеристики исходных масел приведены в *табл. 1*.

Масляные композиции готовили перемешиванием при комнатной температуре. Кинематическую вязкость (в мм<sup>2</sup>/с) масляных композиций измеряли по методу Брукфильда на ротационном вискозиметре «Smart L», производства фирмы Fungilab.

Краевые углы смачивания ( $\theta$ ) водой пленок из масляных композиций определяли с помощью прибора Easy Drop.

Поляризационные измерения проводили с использованием потенциостата IPC-Pro MF в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 0,66 мВ/с в электрохимической ячейке. В качестве исследуемого раствора использовали 0,5 М раствор NaCl. После погружения в раствор рабочие электроды из меди М2, армированные в оправку из эпоксидной смолы, выдерживали 10...15 мин для установления квазистационарного потенциала.

### Результаты и их обсуждение

Изучали вязкостно-температурные зависимости как функции природы масла и концентрации ИК. На *рис. 2а, б* приведены вязкостно-температурные зависимости масел индустриального И-20А, моторного

**Таблица. 1. Некоторые физико-химические характеристики используемых масел**

**Table 1. Some physico-chemical characteristics of the oils used**

Характеристики масел / Characteristics of oils	Масла / Oils		
	М10Г2(к) / М-10G2(к)	ММО / WMO	И-20А / I-20A
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> с <sup>-1</sup> / Kinematic viscosity at 40 °C, mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	11	99	30
Массовая доля воды, % / Mass fraction of water, %	-	0,10	-
Содержание механических примесей, % / Content of mechanical impurities, %	-	0,25	-
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> / Density at 20 °C, kg/m <sup>3</sup>	882	887	882
Зольность, % / Ash content, %	1,0	1,1	0,002

М10Г2(к) свежего и ММО в полулогарифмических координатах с результатами их линейной аппроксимации.

Вязкостно-температурная зависимость в полулогарифмических координатах для индустриального масла И-20А носит линейный характер в диапазоне температур 20...60 °С с высоким показателем достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9951$  (рис. 2а). Согласно этой зависимости, в указанном диапазоне температур возможно использование для расчета кинематической вязкости формулы Рейнольдса – Филонова [11], которую в общем виде можно записать следую-

щим образом:

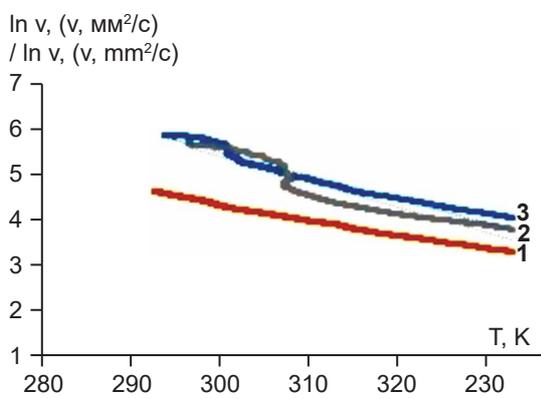
$$\ln v = a + bT,$$

где  $v$  – кинематическая вязкость жидкости;  $T$  – температура жидкости.

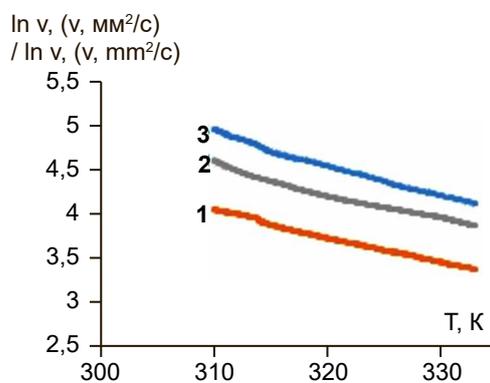
Для масла И-20А  $a = 14,397$ ,  $b = -0,0335$  и эмпирическое выражение для зависимости  $\ln v$  будет иметь вид (табл. 2):

$$\ln v = 14,397 - 0,0335T.$$

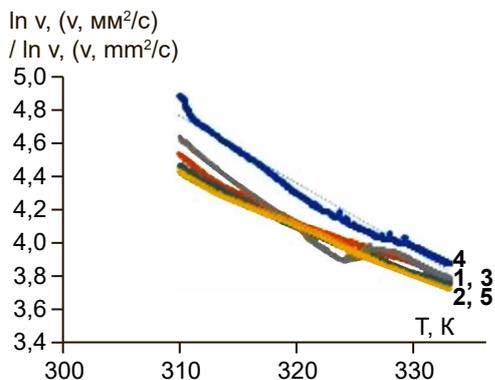
На вязкостно-температурных кривых моторного масла М10Г2(к) свежего и ММО появляются изломы (рис. 2а), вызванные структурными изменениями в этих маслах при изменении температуры, из-за присутствия в маслах присадок и продуктов старе-



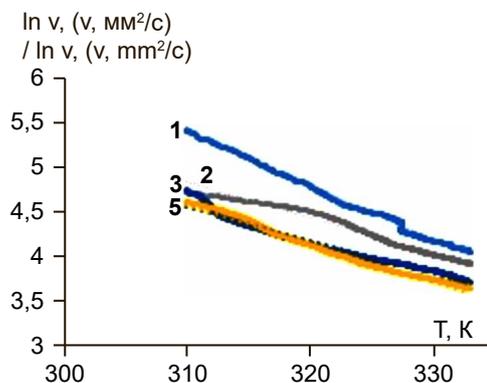
а



б



с



д

Рис. 2. Вязкостно-температурные зависимости в полулогарифмических координатах для исследуемых масел: 1 – И-20А, 2 – ММО, 3 – М-10Г2(к) в диапазоне температур: а – 293...333 К (20...60 °С) и б – 310...333 К (37...60 °С); для композиций на основе ММО с М-531 (с) и парафином П-2 (д), масс. %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 7; 5 – 10 в диапазоне температур 310...333 К. Точками обозначены линии аппроксимации

Fig. 2. Viscosity-temperature dependences in semilogarithmic coordinates for the studied oils: 1 – I-20A, 2 – WMO, 3 – M-10G2(k) in the temperature range: а – 293...333 K (20...60 °С) and б – 310...333 K (37...60 °С); for compositions based on WMO with M-531 (с) and paraffin P-2 (д), wt. %: 1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 7; 5 – 10 in the temperature range 310...333 K. The dots indicate the approximation lines

Таблица. 2. Эмпирические уравнения, связывающие кинематическую вязкость масляной композиции с температурой в диапазоне температур 20...60 °С

Table 2. Empirical equations relating the kinematic viscosity of the oil composition with temperature in the temperature range 20...60 °C

Состав / Compound		Композиции с М-531 / Composition with M-531		Композиции с парафином / Compositions with paraffin	
Масло / Oil	ИК, мас. % / Corrosion inhibitor wt. %	Эмпирические уравнения / Empirical equations	$R^2$ / Reliability approximations $R^2$	Эмпирические уравнения / Empirical equations	$R^2$ / Reliability approximations $R^2$
И-20А	0	$\ln v = 14,397 - 0,0335T$	0,9951		
М10Г2(к)	0	$\ln v = 13,522 - 0,0293T$	0,9862		
ММО	0	$\ln v = 21,875 - 0,0550T$	0,9279		
И-20А / I20-A	3	$\ln v = 13,478 - 0,0308T$	0,9842		
	5	$\ln v = 14,219 - 0,0331T$	0,9835		
	7	$\ln v = 14,146 - 0,0326T$	0,9958		
	10	$\ln v = 14,634 - 0,0341T$	0,9892		
М10Г2(к) / M10G2(k)	3	$\ln v = 14,0354 - 0,0241T$	0,9664	$\ln v = 19,786 - 0,0486T$	0,9242
	5	$\ln v = 14,0742 - 0,0241T$	0,9541	$\ln v = 18,452 - 0,0447T$	0,8309
	7	$\ln v = 14,1457 - 0,0244T$	0,9093	$\ln v = 12,791 - 0,0270T$	0,9891
	10	$\ln v = 14,0831 - 0,0222T$	0,9928	$\ln v = 18,716 - 0,0459T$	0,8950
ММО / WMO	3	$\ln v = 18,809 - 0,0456T$	0,9662	$\ln v = 23,239 - 0,0595T$	0,9946
	5	$\ln v = 18,591 - 0,0449T$	0,9733	$\ln v = 17,353 - 0,0404T$	0,9804
	7	$\ln v = 19,813 - 0,0482T$	0,9839	$\ln v = 16,968 - 0,0391T$	0,9796
	10	$\ln v = 18,545 - 0,0440T$	0,9644	$\ln v = 17,862 - 0,0417T$	0,9851

ния. Эти зависимости более близки к линейным в диапазоне температур 25...60 °С для М10Г2(к), 35...60 °С – для ММО (рис. 2б). А уравнение Филонова–Рейнольдса принимает вид для этих зависимостей в указанных

выше диапазонах температур, соответственно:

$$\ln v = 16,135 - 0,0364T$$

с  $R^2 = 0,9947$  в первом случае.

$$\ln v = 13,135 - 0,0334T$$

с  $R^2 = 0,9926$  – во втором.

Линейное аппроксимирование возможно и в диапазоне 20...60 °С для этих масляных композиций, но достоверность аппроксимации в этом случае уменьшится (табл. 2).

Вязкостно-температурные кривые в полупологарифмических координатах для композиций на основе И-20А и комбинированного ингибитора коррозии М-531 в концентрации 3...10 мас. % близки между собой и могут быть аппроксимированы прямыми линиями с близкими средними значениями коэффициентов  $a_{cp} = 14,17$  и  $b_{cp} = -0,0328$  в диапазоне температур 20...60 °С с высоким показателем достоверности аппроксимации, среднее значение  $R^2 = 0,9897$  (табл. 2). С ростом концентрации ИК в И-20А кинематическая вязкость масляных композиций имеет тенденцию к незначительному росту.

Линейная аппроксимация вязкостно-температурных кривых с получением уравнения Филонова – Рейнольдса возможна для композиций на основе масел М-10Г2(к) и ММО с добавками комбинированного ингибитора коррозии М-531 и парафина (рис. 2с и 2д, табл. 2). Кривые более неравномерны, чем для случая композиций на основе И-20А, поэтому аппроксимирование проходит с большими ошибками (табл. 2). Достоверность аппроксимации в диапазоне температур 20...60 °С при разных концентрациях М-531 в этих маслах составляет 0,9093...0,9928, при разных концентрациях парафина – 0,8309...0,9946. С ростом концентрации ИК кинематическая вязкость масляных композиций в М-10Г2(к) также возрастает. Меньшие колебания по достоверности аппроксимации характерны для композиций на основе как импортного, так и отечественного ИК в ММО. В диапазоне температур 20...60 °С при разных концентрациях М-531 средние значения коэффициентов равны:  $a_{cp} = 18,9395$ , и  $b = -0,0459$ , а среднее значение достоверности аппроксимации составляет  $R^2 = 0,9720$ , а для композиций с парафином:  $a_{cp} = 18,8555$ , и  $b = -0,0452$ , а среднее значение достоверности аппроксимации составляет  $R^2 = 0,9849$ .

Таким образом, вязкостно-температурные кривые для масляных композиций с М-531 и парафином П-2 близки, описываются уравнением Филонова – Рейнольдса в интервале температур 20...60 °С с высокой

степенью достоверности.

На внешний вид, сплошность, адгезионную прочность и защитную способность покрытий влияет качество смачивания и растекания композиций по поверхности металла. Были изучены краевые углы смачивания ( $\theta$ ) водой масляных композиций на основе М-531 и парафина П-2 на меди М2. Значения  $\theta$ , полученные с помощью прибора «Easy Drop» для всех покрытий не превышают 70°, следовательно, вода активно смачивает исследуемые покрытия. Некоторые результаты приведены в табл. 3. Максимальные значения краевых углов смачивания водой масляных покрытий были достигнуты через 1 сутки для композиций с моторными маслами. Для масляных композиций, ингибированных М-531 и парафином, были получены близкие значения углов смачивания.

Электрохимические исследования позволяют дать экспресс-оценку защитных свойств исследуемых масляных композиций. Поляризационные кривые медного электрода с покрытием масляными композициями в 0,5 М растворе NaCl, измеренные после 15-минутной экспозиции, показаны на рис. 3.

Стационарный потенциал коррозии ( $E_{кор}$ ) меди М2 составляет -0,023 В, плотность тока коррозии в фоновом растворе ( $i_{кор}$ ) – 0,0000159 А/м<sup>2</sup>. Наклон тафелевского участка (рис. 3, табл. 4), имеющегося на анодной поляризационной кривой, составляет 55 мВ, катодного – 92 мВ. После нанесения пленки свежего масла И-20А  $E_{кор}$  увеличивается до -0,025 В, а  $i_{кор}$  снижается почти вдвое до 0,0000089 А/м<sup>2</sup>. Защитная эффективность покрытия только этим маслом на меди составляет ~ 44 %. Наклон тафелевского участка на анодной поляризационной кривой (рис. 3, табл. 4) практически не изменился. Ингибирование промышленного масла М-531 позволяет снизить токи коррозии и, соответственно, повысить защитную эффективность масляной пленки (рис. 3а, табл. 4). С ростом концентрации ингибитора в И-20А, защитная эффективность растет и достигает максимума  $Z = 98...99\%$  при 7...10 мас. % М-531. Экспериментальные исследования показали, что композиция с 10 мас. % отечественного парафина в этом масле практически не уступает композиции

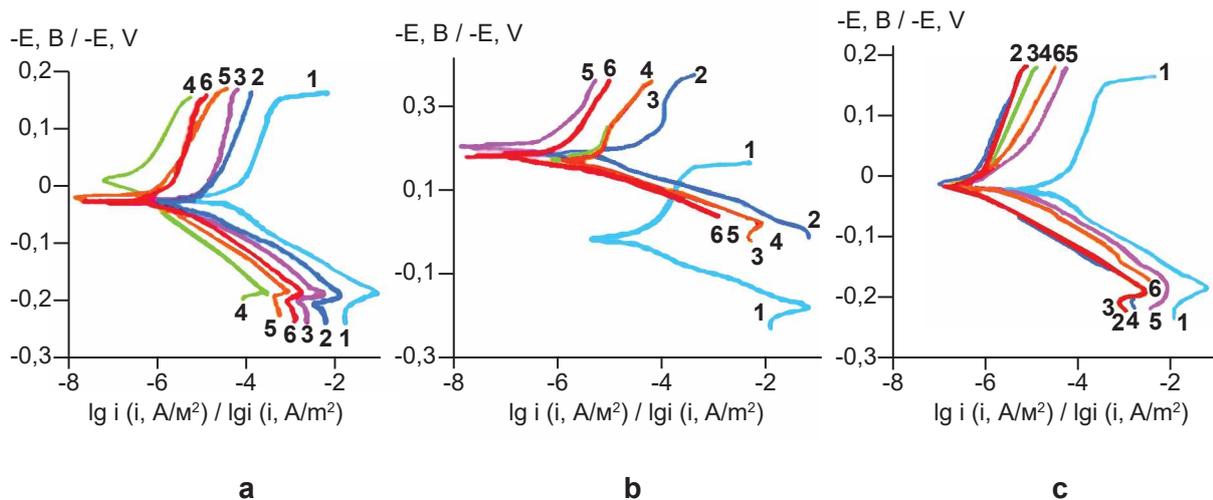


Рис. 3. Поляризационные кривые в 0,5 М растворе NaCl на меди М2, покрытой защитными композициями на основе И20А (а), М10Г2к (б), ММО (с) с М-531, мас. %: 1 – без покрытия, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7, 5 – 10, 6 – с парафином 10 мас. %

Fig. 3. Polarization curves in 0,5 M NaCl solution on copper M2 coated with protective compositions based on I20A (a), M10G2k (b), WMO (c), with M-531 wt. %: 1 – uncoated, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7, 5 – 10, 6 – with 10 wt. % paraffin

Таблица. 3. Краевые углы смачивания водой масляных покрытий с М-531 на меди  
Table 3. Wetting angles of water for oil coatings with M-531 on copper

Покрытие / Surface		Краевые углы смачивания каплями воды (градус) масляных покрытий, сформированных в течение / The contact angles of wetting with water drops (degrees) of oil surface formed during		
Масло / Oil	М-531, мас. % / M-531 wt. %	15 мин. / 15 min	1 сутки / 1 day	2 суток / 2 days
И20-А/ М10Г2к/ ММО / I20-A/ M10G2k/ WMO	0	47/31/29	30/56/45	78/77/76
	3	44/70/26	68/83/83	66/76/73
	5	44/48/50	75/86/76	64/78/78
	7	56/48/43	70/74/75	68/71/75
	10	50/52/26	73/75/80	60/67/76
	Парафин, мас.% / paraf. wt. %	15 мин. / 15 min	1 сутки / 1 day	2 суток / 2 days
	10	52/54/56	72/74/74	60/65/70

Таблица 4. Результаты электрохимических измерений на меди М2 с масляным покрытием на основе ингибитора М-531 в 0,5 М растворе NaCl

Table 4. The results of electrochemical measurements on copper M2 with oil coating based on M-531 inhibitor in 0,5 M NaCl solution

Покрытие / Surface		$-E_{кор}$ , В / $-E_{cor}$ , V	$i_{кор}$ , A/m <sup>2</sup> / $i_{cor}$ , A/m <sup>2</sup>	$b_a$ , В / $b_a$ , V	$b_k$ , В / $b_k$ , V	Z, %
Покрытие / Surface	М-531, мас. % / М-531 wt. %					
Без покрытия		0,0230	0,0000159	0,055	0,092	-
И20-А / I20-A	0	0,0250	0,0000089	0,060	0,040	44
	3	-0,0938	0,00000251	0,167	0,038	84
	5	-0,0433	0,00000158	0,029	0,027	90
	7	0,0245	0,00000013	0,048	0,055	99
	10	0,0200	0,00000032	0,048	0,055	98
	10*	0,0200	0,00000039	0,040	0,041	97
М10Г <sub>2</sub> к / M10G <sub>2</sub> k	0	0,0200	0,00000631	0,050	0,050	60
	3	-0,0094	0,0000060	0,087	0,038	79
	5	0,0180	0,0000050	0,086	0,100	82
	7	0,0190	0,0000030	0,086	0,100	89
	10	0,0210	0,00000030	0,048	0,089	99
	10*	0,0170	0,00000030	0,041	0,036	99
ММО / WMO	0	0,0150	0,00000025	0,060	0,040	98
	3	0,0150	0,00000025	0,060	0,040	98
	5	0,0200	0,00000032	0,167	0,038	99
	7	0,0210	0,00000032	0,029	0,027	99
	10	0,0220	0,00000200	0,048	0,055	99
	10*	0,0100	0,00000063	0,042	0,070	99

\* – парафин / paraffin

с импортным М-531 по защитной эффективности, для нее  $Z = 97\%$  (рис. 3а, табл. 4).

Результаты поляризационных исследований защитных композиций на основе М10Г<sub>2</sub>к представлены на рис. 3б и в табл. 4. Максимальная защитная эффективность пленки наблюдается при 10 мас. % М-531 и пара-

фина,  $Z = 99\%$  в обоих случаях.

Отработанное моторное масло (ММО) даже без добавок М-531 обеспечивает высокую защитную эффективность на меди,  $Z = 98\%$ , а при введении М-531 в концентрации 5...10 мас. %,  $Z = 99\%$  (табл. 4). Поляризационные кривые для масляных композиций при концентрации

М-531 и П-2 10 мас. % близки (рис. 3с). Для масляных композиций с 10 масс. % парафина также  $Z = 99\%$ .

### Выводы

1. Показана принципиальная возможность конкурирования отечественного парафина П-2 как контактной присадки с импортной комбинированной присадкой М-531 в масляных композициях для противокоррозионной защиты меди. Доказана применимость формулы Филонова – Рейнольдса для вязкостно-температурных зависимостей масляных композиций на основе М-531 и П-2 в интервале температур 20...60 °С с высокой степенью достоверности.

2. Исследование краевых углов смачивания показало, что вода активно смачивает исследуемые масляные покрытия. Максимальные значения краевых углов смачивания водой масляных покрытий были достигнуты через 1 сутки.

3. По данным электрохимических исследований, использование комбинированного ингибитора коррозии М-531 и парафина П-2 в масляных композициях для противокоррозионной защиты меди одинаково эффективно при концентрации 10 мас. %.

### Литература

1. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии. / Под ред. Н.Н. Мамота. – Л.: Химия, 1967. – 709 с.

2. Михайлов А.А. Атмосферная коррозия и защита металлов / А.А. Михайлов, Ю.М. Панченко, Ю.И. Кузнецов. – Тамбов, : Изд-во Першина Р.В., 2016. – 555 с.

3. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Князева Л.Г., Шель Н.В., Урядников А.А., Дорохов А.В. / Коррозия и защита металлов летучими ингибиторами в условиях животноводческих помещений (Монография). – Тамбов, : Изд-во Першина Р.В., 2019. – 221 с.

4. Вигдорович В.И. Коррозия и защита металлов в условиях повышенной концентрации оксида серы (IV) и продуктов его гидратации / В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова, П.Н. Бернацкий, Н.В. Шель. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – 364 с.

5. Кузнецов Ю.И., Агафонкина, М.О., Шихалиев, Х.С., Андреева, Н.П., Потапов, А.Ю. Адсорбция и пассивация меди триазолами в

нейтральных водных растворах // Коррозия: материалы, защита. – 2014. – № 7. – С. 33-37.

6. Цыганкова Л. Е., Румянцев, Ф. А. Влияние масляного покрытия и анионного состава электролита на ингибирование коррозии меди бензотриазолом в кислых средах // Коррозия: материалы, защита. – 2006. – № 12. – С. 31-36.

7. Урядников А.А., Камышова А.А. Защита меди антикоррозионными покрытиями на основе синтетического моторного масла с добавками Эмульгина в 0,5 М подкисленном растворе NaCl // Практика противокоррозионной защиты. – 2017. – № 3 (85). – С. 65-70.

8. Вервекин А.С, Шель Н.В. Влияние масляных композиций ИФХАН-29А на коррозию меди в присутствии SO<sub>2</sub> // Вестник Тамбовского Университета. – 2004. – Т. 9, № 1. – С. 67-68.

9. Vignorovich V.I., Shel' N.V. Theoretical Foundations and Practical Development of Few-Component Anticorrosive Oil-Based Conservation Materials // Protection of Metals. – 2005. – Т. 41, № 4. – С. 394-401.

10. Vignorovich V.I., Shel' N.V., Tsygankova L.E., Bernatskii P.N., Zarapina I.V. Features of Electrochemical and Physicochemical Processes on Metals Coated with Oil Films // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 344-351.

11. Vignorovich V.I., Tanygin A.Yu., Tanygina E.D., Selemenev V.F., Nazarova A.A. Rapeseed-Oil Mixtures for Protecting Metals from Atmospheric Corrosion // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 103-114.

12. Ines Dhouibi, Fatma Masmoudi, Mohamed Bouaziz, Mohamed Masmoudi A study of the anti-corrosive effects of essential oils of rosemary and myrtle for copper corrosion in chloride media // Arabian Journal of Chemistry. – 2021. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 102961.

13. Волкова К.В., Успенская М.В., Глазачева Е.Н. Химия нефти и моторного топлива. Лабораторный практикум. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 89 с.

14. Черноухов Н. И. Технология переработки нефти и газа. Ч. 3-я Очистка и разделение нефтяного сырья, производство товарных нефтепродуктов. – М.: Химия, 1978. – 424 с.



15. Шехтер Ю. Н., Ребров И. Ю., Тычкин И. А. Муравьева С. И. Ингибиторы коррозии и противокоррозионные присадки. // Практика противокоррозионной защиты. – 1997, № 1. – С. 28-31.

16. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I. Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 412-423.

17. Knyazeva L.G. Tsygankova L.E., Dorokhov A.V., Kur'yato N.A. Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCI-368D // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2021. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 551-561.

18. Сурин С. А. Отработанные масла: вторая жизнь // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2000. – № 2. – С. 22-24.

### References

1. Todt, F. (1967). *Corrosion and corrosion protection*. Ed. N.N. Mamota L.: Chemistry. (in Russ.)

2. Mikhailov, A. A., Panchenko, Yu. M., & Kuznetsov, Yu. I. (2016). *Atmospheric corrosion and protection of metals*. Tambov: Publishing house Pershina R.V. (in Russ.)

3. Vigdorovich, V. I., Tsygankova, L. E., Knyazeva, L. G., Shel, N. V., Uryadnikov, A. A., & Dorokhov, A. V. (2019). *Corrosion and protection of metals by volatile inhibitors in livestock buildings* (Monograph). Tambov: Pershina R.V. Publishing House. (in Russ.)

4. Vigdorovich, V. I., Tsygankova, L. E., Bernatsky, P. N., & Shel, N. V. (2015). *Corrosion and protection of metals under conditions of increased concentration of sulfur oxide (IV) and its hydration products*. Tambov: Pershin R.V. Publishing House. (in Russ.)

5. Kuznetsov, Yu. I., Agafonkina, M. O., Shikhaliev, Kh. S., Andreeva, N. P., & Potapov, A. Yu. (2014). Adsorption and passivation of copper by triazoles in neutral aqueous solutions. *Corrosion: materials, protection*, 7, 33-37, doi: 10.17675/2305-6894-2014-3-2-137-148(in Russ.)

6. Tsygankova, L. E., Rummyantsev, F. A. (2006). Influence of oil coating and anionic composition of electrolyte on inhibition of copper corrosion by benzotriazole in acidic media. *Corrosion: materials, protection*, 12, 31-36. (in Russ.)

7. Uryadnikov, A. A., Kamyshova, A. A. (2017). Protection of copper with anti-corrosion coatings based on synthetic motor oil with Emulgin additives in 0.5 M acidified NaCl solution. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 3(85), 65-70. (in Russ.)

8. Vervekin, A. S., Shel, N. V. (2004). Influence of IFKhAN-29A oil compositions on copper corrosion in the presence of SO<sub>2</sub>. *Bulletin of the Tambov University*, 9,(1). 67-68. (in Russ.)

9. Vigdorovich, V. I., Shel, N. V. (2005). Theoretical Foundations and Practical Development of Few-Component Anticorrosive Oil-Based Conservation Materials. *Protection of Metals*, 41(4), 394-401.

10. Vigdorovich, V. I., Shel, N. V., Tsygankova, L. E., Bernatskii, P. N., Zarapina, I. V. (2008). Features of Electrochemical and Physicochemical Processes on Metals Coated with Oil Films. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 44(5), 344-351, doi: 10.1007/s10553-008-0061-y

11. Vigdorovich, V. I., Tanygin, A. Yu., Tanygina, E. D., Selemenev, V. F., & Nazarova, A. A. (2009). Rapeseed-Oil Mixtures for Protecting Metals from Atmospheric Corrosion. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 45(2), 103-114, doi: 10.1007/s10553-009-0105-y.

12. Ines Dhouibi, Fatma Masmoudi, Mohamed Bouaziz, Mohamed Masmoudi A study of the anti-corrosive effects of essential oils of rosemary and myrtle for copper corrosion in chloride media (2021). *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2), 102961, doi:10.1016/j.arabjc.2020.102961

13. Volkova, K. V., Uspenskaya, M. V., & Glazacheva, E. N. (2015). *Chemistry of oil and motor fuel*. Laboratory practice. Textbook - St. Petersburg: ITMO University. (in Russ.)

14. Chernoukhov, N. I. (1978). *Technology of oil and gas processing. Part 3 Purification and separation of petroleum feedstock, production of marketable petroleum products*. Moscow: Chemistry. (in Russ.)

15. Shekhter, Yu. N., Rebrov, I. Yu., Tyckin, I. A. & Muravyova, S. I. (1997). Corrosion inhibitors and anti-corrosion additives. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, (1), 28-31. (in Russ.)



16. Vigdorovich, V. I., Knyazeva, L. G., Tsygankova, L. E., Ostrikov, V. V., & Petrashev, A. I. (2019). Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion Materials. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 55(4), 412-423, doi: 10.1007/s10553-019-01046-0

17. Knyazeva, L. G. Tsygankova, L. E.,

Dorokhov, A. V., & Kur'yato, N. A. (2021). Protective efficiency of oil compositions with Cortec VpCl-368D. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(2), 551-561, doi: 10.35887/2305-2538-2019-5-125-133

18. Surin, S. A. (2000). Waste oils: a second life. *World of oil products. Bulletin of oil companies*, (2), 22-24. (in Russ.)

#### Информация об авторах

**Князева Лариса Геннадьевна**, д.т.н., гл.н.с., Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (ВНИИТИН), г. Тамбов, Российская Федерация

**Курьято Николай Алексеевич**, м.н.с., ВНИИТИН, г. Тамбов, Российская Федерация

**Дорохов Андрей Валерьевич**, с.н.с., ВНИИТИН, г. Тамбов, Российская Федерация

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

#### Information about authors

**Larisa G. Knyazeva**, Doctor of Technical Sciences, principal researcher, All-Russian Research Institute for Use Machinery and Petroleum Products in Agriculture (VNIITIN), Tambov, Russian Federation

**Nikolay A. Kuryato**, junior researcher, VNIITIN, Tambov, Russian Federation

**Andrey V. Dorokhov**, senior researcher, VNIITIN, Tambov, Russian Federation

**Victoria A. Bryksina**, graduate student, Tambov State University named after G.R. Derzhavina, Tambov, Russian Federation

В.И. Вигдорович, Л.Е. Цыганкова,  
Н.В. Шель, Л.Г. Князева, А.Н. Зазуля

### Защита металлов от атмосферной коррозии масляными покрытиями

Объем издания: 14,5 п.л. (232 стр.)  
Стоимость 520 руб.

В монографии обобщены литературные данные и результаты собственных исследований авторов, проводимых ими более пятнадцати лет и касающихся кинетики реакции восстановления растворенного кислорода и анодной ионизации металлов под тонкими пленками влаги и защитных неметаллических покрытий на основе товарных и отработанных нефтяных и синтетических масел.

Приводится классификация и свойства широкого круга защитных неметаллических составов. Рассматриваются атмосферная коррозия некоторых конструкционных материалов, защитные свойства композиций, содержащих полиамиды, безоксидная пассивация стали азотсодержащими соединениями – компонентами масляных фаз, результаты многолетних промышленных испытаний эффективности некоторых антикоррозионных покрытий подобного рода.

Впервые в отечественной литературе приводятся подобные данные для поли- $\alpha$ -олефиновых синтетических масел и их тонких поверхностных пленок на основе Мобил-1. Сообщаются вязкостнотемпературные и реологические характеристики неингибированных и ингибированных защитных масляных композиций и тонких пленок, их влаго- и кислородопроницаемость и структура.

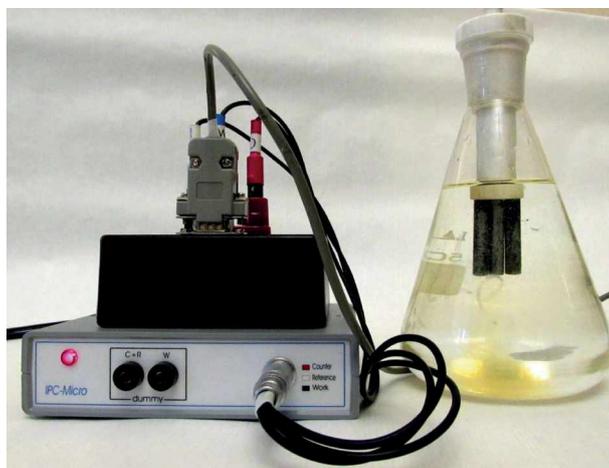
Рассматривается кинетика электродных процессов на углеродистой стали, покрытой масляными пленками в нейтральных и кислых хлоридных средах с изменяющейся и постоянной ионной силой. Оцениваются кинетические параметры электродных реакций в подобных условиях.

## КОРРОЗИМЕТР-ПОТЕНЦИОСТАТ «IPC-CorrMeter» новое программное обеспечение и оборудование

Программное обеспечение «IPC-CorrMeter» (ПО) на базе потенциостатов серии IPC предназначено для коррозионного контроля металлов, сплавов, определения коррозионности водных и водно-органических сред и оценки эффективности ингибиторов коррозии, металлических, конверсионных, металлонаполненных, CVD, PVD, тонких ЛКП, средств временной противокоррозионной защиты. ПО может применяться в научных и учебных организациях, на предприятиях энергетики, нефтяной, газовой, химической, металлургической, горнодобывающей, пищевой, лакокрасочной промышленности, машино- и приборостроения, гальванотехники, коммунального хозяйства.

### ПРЕИМУЩЕСТВА

- функция автоматического коррозиметра и потенциостата IPC «2 в 1», экономичность;
- определение скоростей общей ( $K_p$ ), питтинговой коррозии (P), потенциала коррозии ( $E_{cor}$ ) и контактных токов (I);
- методики поляризационного сопротивления, амперометрии нулевого сопротивления, потенциометрии, хроноамперометрии, вольтамперометрии в одном приборе;
- компенсация омического сопротивления среды;
- непревзойденный диапазон скоростей коррозии – от 1 нм/год до 1 м/год !
- оперативная память коррозиметра «IPC-CorrMeter» – практически не ограничена, определяется только объемом жесткого диска !
- малые габариты прибора – на базе «IPC-Micro»;
- комбинированное питание (от аккумулятора 60 А·ч, 12 В или от сети переменного тока с адаптером) обеспечивает возможность автономной работы до 28 сут;
- возможности проведения коррозионных измерений на крупногабаритных изделиях, например, емкостях, трубах, буровых насосах при гидроиспытаниях, сваях;
- регистрация и обработка получаемых данных на персональных компьютерах;
- разработка датчиков для конкретных условий применения (систем ГВС, водно-органических охлаждающих жидкостей, водооборотных систем, повышенных температур и давлений (до 20 атм));
- консультации и техподдержка от разработчиков ПО, приборов, методик измерений, датчиков коррозии.



КОРРОЗИМЕТР-ПОТЕНЦИОСТАТ  
«IPC-CorrMeter» с переходником и датчиком ДТФ-3Л при измерениях коррозионных показателей



### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (на базе «IPC-Micro»)

- скорость общей и питтинговой коррозии ( $K_p$  и  $P$ ).....0,0001...62500 мкм/год;
- электродные потенциалы ( $E_{cor}$ )..... $\pm 2500$  мВ (0,01 мВ);
- сила постоянного тока ( $I$ ).....  $\pm 10000$  мкА (0,001мкА);
- время установки рабочего режима.....не более 5 мин;
- рабочие температуры:  
IPC.....0...40 °С;  
датчиков ДТФ-2 (3).....минус 50...+100 °С;
- режим работы.....двух-трехэлектродный;
- продолжительность непрерывной работы от аккумулятора 60 А·ч.....до 28 сут;
- габаритные размеры комплекта, мм, не более.....200×100×30.

### КОНТАКТЫ:

- По методикам использования программы IPC-Cor-Meter и проведению коррозионного мониторинга, способам коррозионных измерений, изготовлению и конструкции коррозионных датчиков ДТФ-2, ДТФ-3 и др.: **Н.Г. Ануфриев**, +7(926)758-96-30, e-mail: [anufrievng@mail.ru](mailto:anufrievng@mail.ru)
- По применению программного обеспечения IPC-Corr-Meter, работе и обслуживанию потенциостатов серии IPC: **В.Э Касаткин**, e-mail: [vadim\\_kasatkin@mail.ru](mailto:vadim_kasatkin@mail.ru)
- Потенциостаты, датчики, переходники изготавливаются по специальному заказу для конкретных условий применения прибора. Срок поставки прибора и датчиков – не более 1 мес. со дня заказа.

Поставки: **Д.Н. Ануфриев**, +7(925)411-60-64, e-mail: [4116064@mail.ru](mailto:4116064@mail.ru)

### ЦЕНТР ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ

- разработка оптимальных технологических решений, средств противокоррозионной защиты, методик, приборов по заданиям предприятий, научных организаций, фирм и частных лиц в области защиты от коррозии в промышленности, строительстве, на транспорте, энергетике, добыче полезных ископаемых и других отраслях по базам зарубежных и отечественных патентов, собственных многолетних разработок и научных исследований;
- выбор наиболее эффективных средств противокоррозионной защиты путем проведения ускоренных, стендовых и натурных испытаний металлов, сплавов, лакокрасочных и металлических покрытий, ингибиторов коррозии металлов;
- экспериментальная апробация и оптимизация технологий в лабораторных, стендовых и производственных условиях на базе ведущих научных организаций и предприятий;
- патентование в РФ и странах ЕАЗЭС, лицензирование и сертификация технологических решений, материалов, приборов.

#### Контакты:

Николай Геннадиевич Ануфриев  
8(930)335-28-91;  
8(926)758-96-30  
e-mail: [anufrievng@mail.ru](mailto:anufrievng@mail.ru)



## **СЕРТИФИКАЦИЯ**

### **Сертификаты, выданные Центральным НИИ коррозии и сертификации и ООО «КАРТЭК» в I квартале 2024 г.**

<b>Предприятие-изготовитель</b>	<b>Наименование продукции</b>
<b>Сертификаты соответствия</b>	
ЗАО «ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТА», г. Тула	Электроды анодного заземления из электропроводного эластомера серии ЭЛЭР
ООО «ПЛАЗМА», г. Альметьевск	Коррозионно-стойкое покрытие SUPER-STAINLESS
ООО «ПЛАЗМА» ИТК, г. Альметьевск	Коррозионно-стойкое покрытие SUPER-STAINLESS
ООО ПО «СанТермо», г. Екатеринбург	Компенсаторы сильфонные и компенсационные устройства
ООО «ПК «ТЕПЛОПАЙП», г. Казань	Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой
ООО «НефтеГазХим», г. Москва	Депрессор «ДРП 101» и «ДРП 101К»
<b>Сертификаты на применение химпродукта в технологических процессах добычи и транспорта нефти</b>	
ООО «Урал-Цемент», г. Челябинск	Кальцит молотый
ООО «НефтеГазХим», г. Москва	Депрессор «ДРП 101» и «ДРП 101К»

## ИЛ «Центр физхимэкспертизы»

Испытательная лаборатория «ЦЕНТР СУДЕБНЫХ И НЕСУДЕБНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ И ИССЛЕДОВАНИЙ» (ИЛ «Центр физхимэкспертизы», Аттестат аккредитации ТЭК RU. 03 ЮЛ 22-Кор-019), созданная совместно Центральным научно-исследовательским институтом коррозии и сертификации и Институтом физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, проводит **все виды физико-химических анализов, экспертиз, обследований материалов и оборудования, в том числе для арбитражных процессов**. По результатам работы оформляются официальные протоколы и заключения.

ИЛ «Центр физхимэкспертизы» проводит также **анализы химических продуктов, нефти и нефтепродуктов на содержание легких хлорорганических соединений (ЛХОС) и четвертичных аммонийных соединений (ЧАС)**.

+7 985 776 10 21

+7 916 233 96 59

e-mail: [cartec-com@mail.ru](mailto:cartec-com@mail.ru)





## ЗАО «ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТА»

**РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОДОВ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ СЕРИИ «ЭЛЭР» ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ЭЛАСТОМЕРА ДЛЯ УСТАНОВОК КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ГРУНТЕ, ПРЕСНОЙ И МОРСКОЙ ВОДЕ**

Собственная оригинальная, согласованная с ОАО «ГАЗПРОМ» и ОАО «ВНИИСТ» нормативно-техническая документация по проектированию, монтажу и эксплуатации эластомерных электродов.

Продукция аттестована к серийному производству и применению в 1999 году Межведомственной комиссией ОАО «ГАЗПРОМ», сертифицирована органами Госстандарта РФ, разрешена к применению Ростехнадзором РФ.

**Продукция эксплуатируется БОЛЕЕ 20 ЛЕТ**

**ШИРОКИЙ  
СПЕКТР  
СЕРИЙНО  
ВЫПУСКАЕМЫХ  
МОДИФИКАЦИЙ  
ЭЛЕКТРОДОВ**

- ЭЛЕКТРОДЫ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ТИПА
- МОДУЛИ АНОДНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ
- ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ГЛУБИННЫХ АНОДНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ
- КОМПЛЕКТНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ВСЕХ МОДИФИКАЦИЙ В ЗАВОДСКОЙ КОКСОВОЙ УПАКОВКЕ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КПД ЗАЩИТЫ 85-90 %**

[www.anod-er.ru](http://www.anod-er.ru)

ЗАО «ЭХЗ»

Тел./факс (4872) 26-77-76, 70-01-33

E-mail: ehz@tula.net; ehz-eler@mail.ru