

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>

EDN: <https://elibrary.ru/akdfth>

УДК / UDK 620.197.3

Оригинальная статья / Original article

Технология защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений

Х. Д. Куанг^{1,3}, С. М. Гайдар^{1,2}, А. М. Пикина^{1,2}✉,
О. М. Лапсарь^{1,2}, Т. Т. С. Нгуен³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
г. Москва, Российская Федерация

² Российский государственный университет
им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
г. Москва, Российская Федерация

³ Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр,
г. Хошимин, Вьетнам

✉ pikina@rgau-msha.ru

Аннотация

Введение. Одним из перспективных классов ингибиторов коррозии являются летучие или парофазные, которые, испаряясь при температуре окружающей среды, адсорбируются на поверхности металлов и обеспечивают надежную анткоррозионную защиту. Летучие ингибиторы коррозии проникают в щели и зазоры, недоступные контактным ингибиторам, обеспечивают торможение коррозионных процессов по слоям продуктов коррозии. Их применение оправдано при герметизации защищаемого пространства, предотвращающей улетучивание ингибиторов. В настоящее время не существует слаболетучих ингибиторов коррозии, устойчивых к температуре выше 80 °C, поэтому используются различные упаковочные материалы, обладающие малой влаго- и газопроницаемостью. В процессе применения таких материалов при консервации металлических изделий выявлены недостатки: гигроскопичность бумаги, процесс деструкции летучих ингибиторов коррозии при температуре экструзии полимеров, большая доля ручного труда при консервации.

Цель исследования. Разработать эффективную технологию защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений – летучих ингибиторов коррозии.

Материалы и методы. По результатам проведенных электрохимических и ускоренных испытаний рассчитаны скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения. В качестве образцов, на которых было испытано анткоррозионное

© Куанг Х. Д., Гайдар С. М., Пикина А. М., Лапсарь О. М., Нгуен Т. Т. С., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

действие летучих ингибиторов коррозии, выбраны пластины из стали марки Ст3. Для определения защитной эффективности полученных ингибиторов проведены лабораторные испытания. Реагенты были представлены этаноламином, борной кислотой,mono(аминоэтил)боратом,ди(аминоэтил)боратом и три(аминоэтил)боратом; соотношение реагентов и температура реакции варьировались в процессе исследований.

Результаты исследования. По результатам работы получена серия летучих ингибиторов коррозии. Определено, что при электрохимическом исследовании в 0,1 моль/л растворе хлорида натрия наилучшие результаты зафиксированы в составе на основе этаноламина и борной кислоты в соотношении три к одному, а именно три(аминоэтил)борат. Оптимальная концентрация ингибитора на стальных поверхностях при ускоренных испытаниях в среде с относительной влажностью воздуха 100 % составляет 200 г/м³.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты имеют потенциал для практического применения по защите от атмосферной коррозии черных и цветных металлов. Перспективной сферой их использования является защита с помощью летучих ингибиторов стального оборудования и систем электрозащиты, содержащих цветные (медь, латунь) металлы, в сельскохозяйственном производстве, машиностроении и других областях.

Ключевые слова: ингибитор коррозии, реакция конденсации, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат, три(аминоэтил)борат, этаноламин, борная кислота

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Куанг Х.Д., Гайдар С.М., Пикина А.М., Лапсарь О.М., Нгуен Т.Т.С. Технология защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):606–622. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>

Investigation of the Protective Effectiveness of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Protecting Ferrous and Non-Ferrous Metals

H. D. Quang^{a,c}, S. M. Gaidar^{a,b}, A. M. Pikina^{a,b}✉, O. M. Lapsar^{a,b}, T. T. X. Nguyen^c

^a Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

^b The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russian Federation

^c Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center, Ho Chi Minh, Vietnam

✉ pikina@rgau-msha.ru

Abstract

Introduction. A promising class of corrosion inhibitors is volatile or vapor-phase ones. They evaporate at ambient temperatures adsorbing on metal surfaces and providing reliable corrosion protection. Volatile corrosion inhibitors penetrate crevices and gaps inaccessible to contact inhibitors, inhibiting corrosion processes along layers of corrosion products. Their use is justified by sealing the protected space, preventing inhibitor evaporation. Currently, there are no low-volatile corrosion inhibitors resistant to temperatures

above 80°C, so various packaging materials with low moisture and gas permeability are used. The use of such materials for preserving metal products has revealed several disadvantages: the hygroscopic nature of paper, the degradation of volatile corrosion inhibitors at polymer extrusion temperatures, and the high degree of manual labor required during preservation.

Aim of the Study. The study is aimed at developing an effective technology for protecting ferrous and non-ferrous metals using nitrogen-containing organic compounds – volatile corrosion inhibitors.

Materials and Methods. Based on the results of electrochemical and accelerated tests, the corrosion rate, protection level, and inhibition coefficient were calculated. St3 steel plates were selected as the samples on which the anticorrosive effect of volatile corrosion inhibitors was tested. Laboratory tests were conducted to determine the protective effectiveness of the resulting inhibitors. The reagents included ethanalolamine, boric acid, mono(aminoethyl)borate, di(aminoethyl)borate, and tri(aminoethyl)borate. The reagent ratio and reaction temperature were varied during the study.

Results. A series of volatile corrosion inhibitors were obtained in this study. It was determined that, in electrochemical testing in a 0.1 mol/l sodium chloride solution, the best results were obtained with a composition based on ethanalolamine and boric acid in a three-to-one ratio, namely, tri(aminoethyl)borate. The optimal inhibitor concentration on steel surfaces during accelerated testing in an environment with 100% relative humidity is 200 g/m³.

Discussion and Conclusion. The results obtained have potential for practical application in atmospheric corrosion protection of ferrous and non-ferrous metals. A promising area of application is the protection of steel equipment and electrical protection systems containing non-ferrous metals (copper, brass) using volatile inhibitors in agricultural production, mechanical engineering, and other fields.

Keywords: corrosion inhibitor, condensation reaction, aminoethyl borate, di(aminoethyl) borate, tri(aminoethyl)borate, ethanalolamine, boric acid

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Quang H.D., Gaidar S.M., Pikina A.M., Lapsar O.M., Nguyen T.T.X. Investigation of the Protective Effectiveness of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Protecting Ferrous and Non-Ferrous Metals. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):606–622. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из металлов под действием различных природных, физико-химических и биологических факторов корродируют и теряют свои потребительские качества. Выбор оптимального способа защиты металлов, зависящего от области применения изделия, позволяет значительно снизить материальный ущерб, вызванный коррозией [1; 2]. В настоящее время одним из распространенных методов защиты металлов от коррозии является использование ингибиторов [3–5]. Основное его преимущество – возможность значительного снижения коррозионного разрушения при наименьших затратах. Многочисленные исследования в области защиты металлов от коррозии связаны с поиском новых и изучением уже существующих ингибирующих составов.

Среди наиболее перспективных классов ингибиторов коррозии выделяются летучие ингибиторы коррозии (ЛИК) [6; 7], применение которых возможно при наличии изолированного защищаемого пространства. При переходе ЛИК в газообразное состояние его молекулы проникают в зазоры, недоступные другим видам ингибиторов, адсорбируются на поверхности металла и образуют защитную пленку, обеспечивающую замедление коррозионных процессов и, как следствие, защиту металлоизделия.

В качестве летучих ингибиторов коррозии металлов используются органические соединения различных классов: азотсодержащие (амины, азолы, нитросоединения), кислородсодержащие (спирты, сложные эфиры органических и неорганических кислот) и другие соединения [8].

Высокую антакоррозионную активность по отношению к черным и цветным металлам показали аминоспирты. Антакоррозионное действие таких производных спиртов можно объяснить образованием комплексных соединений между гетероатомами (азотом или кислородом) и ионом металла. Использование борных эфиров аминоспиртов позволяет также получать прочные хелатные комплексы. Это приводит к образованию на поверхности металла труднорастворимых защитных пленок, которые формируются за счет донорно-акцепторной связи между атомами азота и кислорода, с одной стороны, и атомом металла – с другой [9].

Взаимодействие этаноламинов с борной кислотой может приводить к большому количеству различных продуктов в зависимости от условий проведения реакции. В настоящем исследовании синтезирована серия веществ в результате взаимодействия этаноламина и борной кислоты, а также изучены антакоррозионные свойства новых ингибиторов коррозии на образцах из стали Ст3.

Цель исследования – разработать технологию синтеза летучих ингибиторов коррозии с использованием азотсодержащих органических соединений и провести оценку их защитной эффективности по отношению к черным и цветным металлам.

Задачи исследования:

- 1) разработать рецептуру летучего ингибитора коррозии;
- 2) оптимизировать концентрацию ингибитора в защищаемой среде;
- 3) определить защитную эффективность полученных ингибиторов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Один из наиболее перспективных классов ингибиторов коррозии – летучие ингибиторы [10; 11]. Их применение оправдано в случае наличия возможности частичной изоляции защищаемого пространства. Испаряясь при температуре окружающей среды, такие ингибиторы в виде паров достигают металла, адсорбируются на его поверхности и, насыщая конденсированные фазы, обеспечивают надежную защиту изделия. Пары летучего ингибитора коррозии проникают в щели и зазоры, недоступные контактным ингибиторам, обеспечивают торможение коррозионных процессов под слоями продуктов коррозии и отложений [12–14].

Началом проведения ежегодных симпозиумов по теме коррозионных разрушений и защите изделий от коррозии является 1960 г. [15]. В результате учеными были разработаны многие виды летучих ингибиторов, которые не имели недостатков предыдущих материалов и были способны замедлять анодные и катодные процессы коррозии [16; 17].

К настоящему времени уже выпущен огромный ряд безвредных для человека ингибиторов: VIBATAN Metal Antiox01792 – защищает от коррозии как черные, так и цветные металлы, используется для защиты металлических изделий, электронных и электротехнических их частей [18].

Наиболее распространенными летучими ингибиторами отечественного производства являются производные и соли алифатических, ароматических, циклических и гетероциклических аминов [19]: НДА, Г-2, КЦА, ИФХАН-100 и ВНХЛ-49, а также добавился целый ряд новых образцов: ВНХ-Л-20, Н-М1, ФМТ, ИФХАН-34, ИФХАН-67, ИФХАН-118, НДА, ХЦА, КЦА, СП-В, КПГ-ПК.

Ингибитор атмосферной коррозии Н-М-1 применяют для защиты металлов от атмосферной и биологической коррозии в процессе всей эксплуатации изделия в различных климатических условиях. К подобным ингибиторам также относится состав ВНХ-Л-20 [19]. Основное назначение средства – защита сложных металлических поверхностей и неметаллических материалов от биоповреждений. Его применяют внутри изолированного пространства для консервации, хранения и при транспортировке грузов на дальние расстояния.

ИФХАН-118 – универсальный ингибитор коррозии 4-го поколения, его применение на практике регламентируется ГОСТ 9.014-78 «ЕСЗКС. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования» [20]. Эффективен при защите широкого спектра черных и цветных металлов (с покрытиями и без) в агрессивных атмосферах, а также для защиты железа, алюминия, меди, цинка, олова и их сплавов. Технология использования ингибитора зависит от конкретной задачи.

Анализ существующих аналогичных защитных материалов показал, что технической проблемой в данной сфере является необходимость расширения ассортимента антакоррозионных составов для защиты металлических поверхностей. Проведенные исследования по разработке состава и оценке его эффективности актуальны ввиду повышенных требований к коррозионной стойкости изделий из черных металлов в условиях высокой влажности и температуры, а также воздействия соляного тумана [20].

Полученное соединение при малой летучести образует достаточное давление насыщенного пара для эффективной защиты.

Разработанный состав ЛИК позволяет его применять в виде растворов, аэрозолей, а также на специальных носителях – силикагеле, оксиде алюминия, поропластах и др.

Несмотря на многочисленные публикации по изучаемой проблематике, до сих пор отсутствуют исследования по механизму защитного действия ингибиторов, не установлены зависимости защитного эффекта от количества функциональных групп. В данном исследовании проведен анализ получаемых продуктов конденсации этаноламинов и борной кислоты, представлена структурная формула полученного вещества, а также установлена зависимость защитной эффективности летучего ингибитора от количества функциональных групп. Потенциометрические исследования позволили описать механизм защитного действия ингибитора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Химические материалы

В качестве химических материалов использованы сталь марки Ст3 по ГОСТ 380-2005¹, борная кислота, этаноламин, NaCl.

¹ ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/5550/> (дата обращения: 21.02.2025).

Методы исследования

Синтез летучих ингибиторов коррозии

Синтез аминоэтилбората (V1). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 30,5 г (0,5 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °C, после чего добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Получившаяся смесь нагревалась до 130 °C, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси увеличили до 160 °C, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V1) после охлаждения до комнатной температуры принял вид стеклянной твердости.

Синтез ди(аминоэтил)бората (V2). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 61,0 г (1,0 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °C, затем добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Смесь нагревали до 130 °C, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси увеличили до 160 °C, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V2) после охлаждения до комнатной температуры принял вид прозрачной однородной жидкости (78,2 г) с аминовым числом 395,9 мгHCl/г.

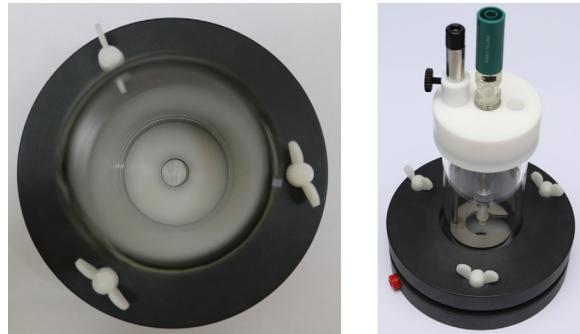
Синтез три(аминоэтил)бората (V3). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 91,5 г (1,5 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °C, затем добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Смесь нагревали до 130 °C, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси поднимали до 160 °C, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V3) после охлаждения до комнатной температуры принял вид прозрачной однородной жидкости (105,2 г) с аминовым числом 499,9 мгHCl/г.

Электрохимические исследования

Образцы рабочих электродов из стали Ст3 механически и химически (раствор C₂H₅OH в 3 %-м HNO₃) полировались с последующим обезжириванием в смеси ацетона и этилового спирта. Площадь рабочего электрода составляла 0,785 см².

Электрохимические исследования выполнялись на потенциостате PGSTAT302N с трехэлектродной системой: рабочий электрод был изготовлен из исследуемого материала (сталь Ст3); в качестве электрода сравнения применяли хлорсеребряный электрод, помещенный в капилляр Габера – Лутгина (рис. 1); противоэлектрод из нержавеющей стали. В качестве фонового раствора использовался 0,1 моль/л раствор NaCl. Диапазон сканирующего потенциала, рассчитанный по хлорсеребряному электроду сравнения, составляет от -0,5 до +0,5 В; скорость сканирования – 0,25 В/с; время погружения образца перед измерением – 300 с, что регламентируется ГОСТ 9.509-89². Температура во всех измерениях была постоянной $t = 25$ °C. Параметры коррозии стали Ст3 рассчитывались методом тафелевской экстраполяции с использованием программного обеспечения NOVA 2.1.

² ГОСТ 9.509-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014793> (дата обращения: 21.02.2025).



Р и с. 1. Рабочий электрод (сталь Ст3) и держатель рабочего электрода
Fig. 1. Working electrode (St3 steel) and working electrode holder

Источник: рисунки составлены авторами статьи в программе AdobePhotoshop.
Source: the figures were created by the authors of the article using Adobe Photoshop.

Степень защиты ($Z, \%$) определяли по формуле [21]:

$$Z = \left(1 - \frac{K}{K_0} \right) \cdot 100,$$

где K_0 – скорость коррозии стали Ст3 в фоновом растворе в отсутствии ингибитора, мм/г; K – скорость коррозии стали Ст3 в фоновом растворе в присутствии ингибитора, мм/г.

Коэффициент торможения γ рассчитывали по формуле:

$$\gamma = \frac{K_0}{K}.$$

Антикоррозионное ускоренное испытание

Испытательные пластиинки из стали Ст3 с площадью поверхности $(50,0 \times 50,0) \pm 0,2$ мм, толщиной 3,0–3,5 мм зачищали наждачной бумагой, промывали в спирте, ацетоне и высушивали. Образцы подвешивали вертикально на штативах из нержавеющей стали так, чтобы расстояние между ними составляло не менее 10 мм и не менее 100 мм от дна банки, а испытательный штатив помещали в банку-экскатор с плотной крышкой.

Образцы летучих ингибиторов коррозии помещали в колбу, концентрация ингибитора составляла $100\ldots300$ г/м³. Испытания проводили в течение трех дней при температуре 25°C для обеспечения адсорбции ингибитора на поверхности исследуемых образцов. Контрольный образец был также обработан ЛИК, но в колбу не помещался.

Относительная влажность в колбе составила 100 % (относительную влажность поддерживали добавлением на дно колбы дистиллированной воды в объеме 1/100 колбы). Исследования проводили в 20 циклов, длительность одного цикла составляла 24 ч. При начале каждого цикла в первые 7 ч камеру нагревали до $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Далее камера остывала до комнатной температуры ($25 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Образцы выдерживались при данной температуре в течение последующих 17 ч для конденсации влаги на исследуемых образцах.

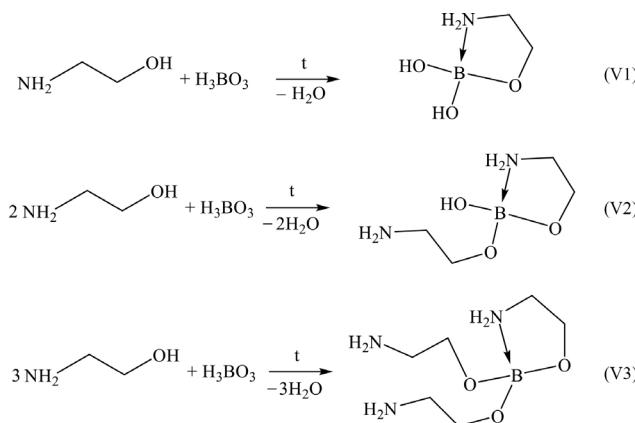
После окончания периода испытаний (20 циклов) образец вынимали из испытательного сосуда, промывали этианолом, ацетоном и сушили.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты синтеза ингибиторов

Взаимодействие этианоламина с борной кислотой может приводить к образованию различных продуктов, что зависит от соотношения исходных реагентов и условий проведения реакции (рис. 2).

При нагревании происходит конденсация борной кислоты и этианоламина с выделением воды. Строение образующихся эфиров борной кислоты зависит от соотношения исходных реагентов. При проведении реакции в мольном соотношении 1:1, 2:1 и 3:1 образуются аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат соответственно (рис. 2); в мольном соотношении 1:1 – аминоэтилборат (V1) в виде стеклянной твердости, не обладающей летучестью, поэтому рассматривать их в качестве летучих ингибиторов коррозии было нецелесообразно.



Р и с. 2. Взаимодействие этианоламина с борной кислотой в различных мольных соотношениях

F i g. 2. Interaction of ethanolamine with boric acid in various molar ratios

Источник: рисунок составлен авторами статьи.

Source: the diagram was compiled by the authors of the article.

По результатам проведенных электрохимических и ускоренных испытаний были рассчитаны скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения.

Результаты электрохимических исследований

Сравнение защитной способности различных ингибиторов

Для сравнения защитной способности ингибиторов электрохимическим методом были взяты образцы ингибиторов V1, V2, V3 в одной концентрации 2,0 % в фоновом 0,1 моль/л растворе NaCl. Результаты исследования представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в 0,1 моль/л растворе NaCl ингибитора ускоряют катодную и сильно замедляют анодную реакции, при этом потенциал коррозии смещается в положительную сторону.

Таким образом, ингибиторы V1, V2, V3 по характеру защитного действия являются соответственно анодными. Наблюдаемый синергетический эффект ингибиторов можно объяснить их воздействием на анодные участки. Анодные ингибиторы – доноры электронов по отношению к металлу, уменьшают энергию выхода электрона из металла. Данный ингибитор образует хемосорбционные соединения прежде всего на положительно заряженных электроноакцепторных участках, т. е. на анодных участках корродирующего металла.

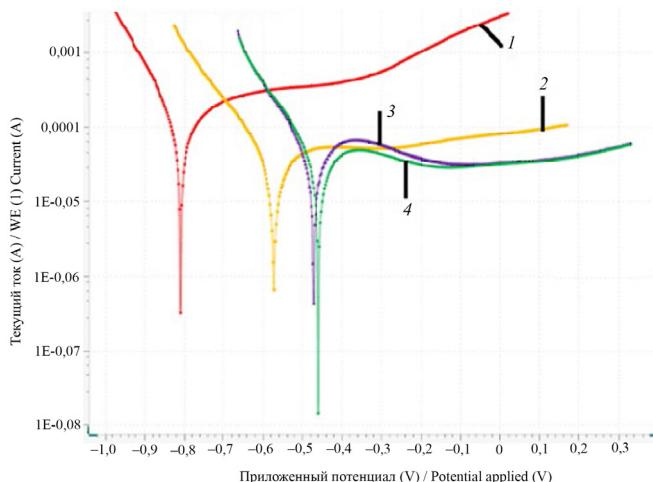


Рис. 3. Поляризационные кривые на стали Ст3 при различных ингибиторах:
1 – фоновый раствор; 2 – V1; 3 – V2; 4 – V3

Fig. 3. Polarization curves on St3 steel with using different inhibitors:
1 – background solution; 2 – V1; 3 – V2; 4 – V3

Источник: рисунки 3, 4 составлены авторами статьи в программе Nova 2.1.

Source: the figures 3, 4 were created by the authors of the article using the Nova 2.1 program.

Примечание: ингибиторы V1, V2 и V3 в одинаковой концентрации 2 %.

Note: V1, V2 and V3 inhibitors at the concentration of 2%.

Таблица 1
Table 1

Параметры коррозии стали Ст3 в 0,1 моль/л растворе NaCl в зависимости от различных ингибиторов

Corrosion parameters of St3 steel in a 0.1 mol/l NaCl solution depending on various inhibitors

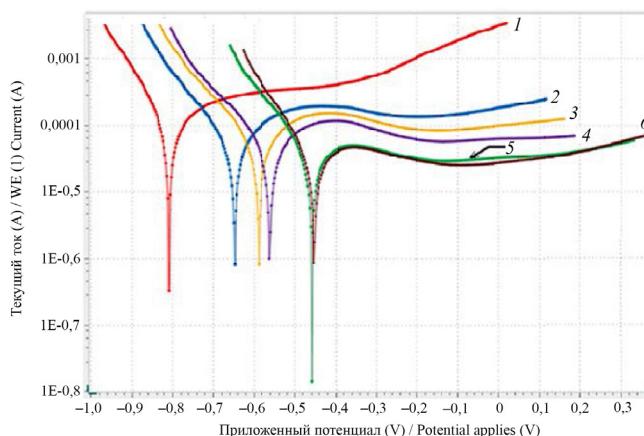
№	Ингибитор / Inhibitor	$ b_a $, V/dec	$ b_c $, V/dec	$-E_{corr}$, mB / mB	i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ / A/cm^2	K, $\text{мм}/\text{г}$ / mm/g	Z, %	γ
1	*	0,280	0,101	808	93,508	0,6168	–	–
2	V1	0,477	0,141	571	31,198	0,2058	66,640	3,000
3	V2	0,197	0,096	473	26,925	0,1776	71,210	3,470
4	V3	0,220	0,096	458	22,821	0,1505	75,590	4,100

Примечание: * – контрольный опыт в фоновом растворе; V2 – ингибитор 2; V3 – ингибитор 3.
*Note:** – control experiment in the background solution; V2 – inhibitor 2; V3 – inhibitor 3.

Наблюдается увеличение ингибиции коррозии в следующем порядке:monoэтаноламин < ди(аминоэтил)борат < три(аминоэтил)борат. Ингибитор V3 обеспечивает наилучшее торможение процесса коррозии происходит при использовании, что согласуется с ускоренными испытаниями. Как видно из поляризационных кривых, такой ингибитор перемещает потенциал в положительную сторону ($\Delta E_{corr} = 350\text{mV}$), по сравнению с E_{corr} в фоновом растворе.

Исследования защитной способности ингибитора V3 при различных концентрациях

Для исследования были взяты ингибитор V3 в диапазоне концентрации $0,5 \div 3,0\%$ в $0,1$ моль/л фоновом растворе NaCl . Результаты исследования представлены на рисунке 4, 5 и в таблице 2.



Р и с. 4. Электрохимические исследования стали Ст3

при различных концентрациях ингибитора V3:

1 – фоновый раствор; 2 – 0,5%; 3 – 1,0%; 4 – 1,5%; 5 – 2,0%; 6 – 3,0%

F i g. 4. Electrochemical studies of St3 steel at various concentrations of V3 inhibitor:

1 – background solution; 2 – 0.5%; 3 – 1.0%; 4 – 1.5%; 5 – 2.0%; 6 – 3.0%

Т а б л и ц а 2

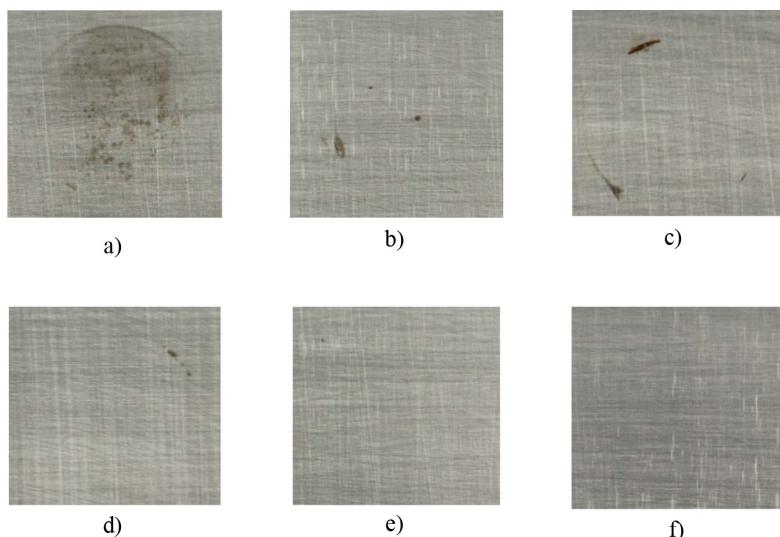
T a b l e 2

Параметры коррозии стали Ст3 в 0,1 моль/л растворе NaCl в зависимости от различных концентраций ингибитора V3

St3 steel corrosion parameters in a 0.1 mol/l NaCl solution, depending on different concentrations of the V3 inhibitor

№	Концентрация, % / Concentration, %	$ b_a $, V/dec	$ b_c $, V/dec	$-E_{corr}$, мВ / mB	i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ / A/cm^2	K, mm/T / mm/g	Z, %	γ
1	0,0	0,280	0,101	808	93,508	0,6168	–	–
2	0,5	0,203	0,136	648	46,526	0,3069	50,24	2,01
3	1,0	0,193	0,132	588	42,247	0,2787	54,82	2,21
4	1,5	0,197	0,126	561	35,478	0,2340	62,06	2,64
5	2,0	0,220	0,096	458	22,821	0,1505	75,59	4,10
6	3,0	0,226	0,092	452	22,348	0,1474	76,10	4,18

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в 0,1 моль/л растворе NaCl ингибитора V3 при концентрации от 0,5 до 3 % ускоряет катодную и сильно замедляют анодную реакции, потенциал коррозии смещается при этом в положительную сторону. Защитная способность стали Ст3 от коррозии постепенно значительно увеличивается с концентрацией V3 от 0,5 до 2,0 % и достигает 75,59 % при концентрации 2 %; при концентрации V3 более 2 % защитная способность незначительно увеличивается. Это обусловлено тем, что при концентрации 2 % поверхность металлического образца практически полностью покрывается ингибитором. Дальнейшее повышение концентрации не приводит к значительному увеличению уровня покрытия стальной поверхности.



Р и с. 5. Изображение поверхности рабочего электрода стали Ст3 после электрохимического исследования при различных концентрациях V3:
а) контроль; б) 0,5 %; в) 1,0 %; г) 1,5 %; д) 2,0 %; е) 3,0 %

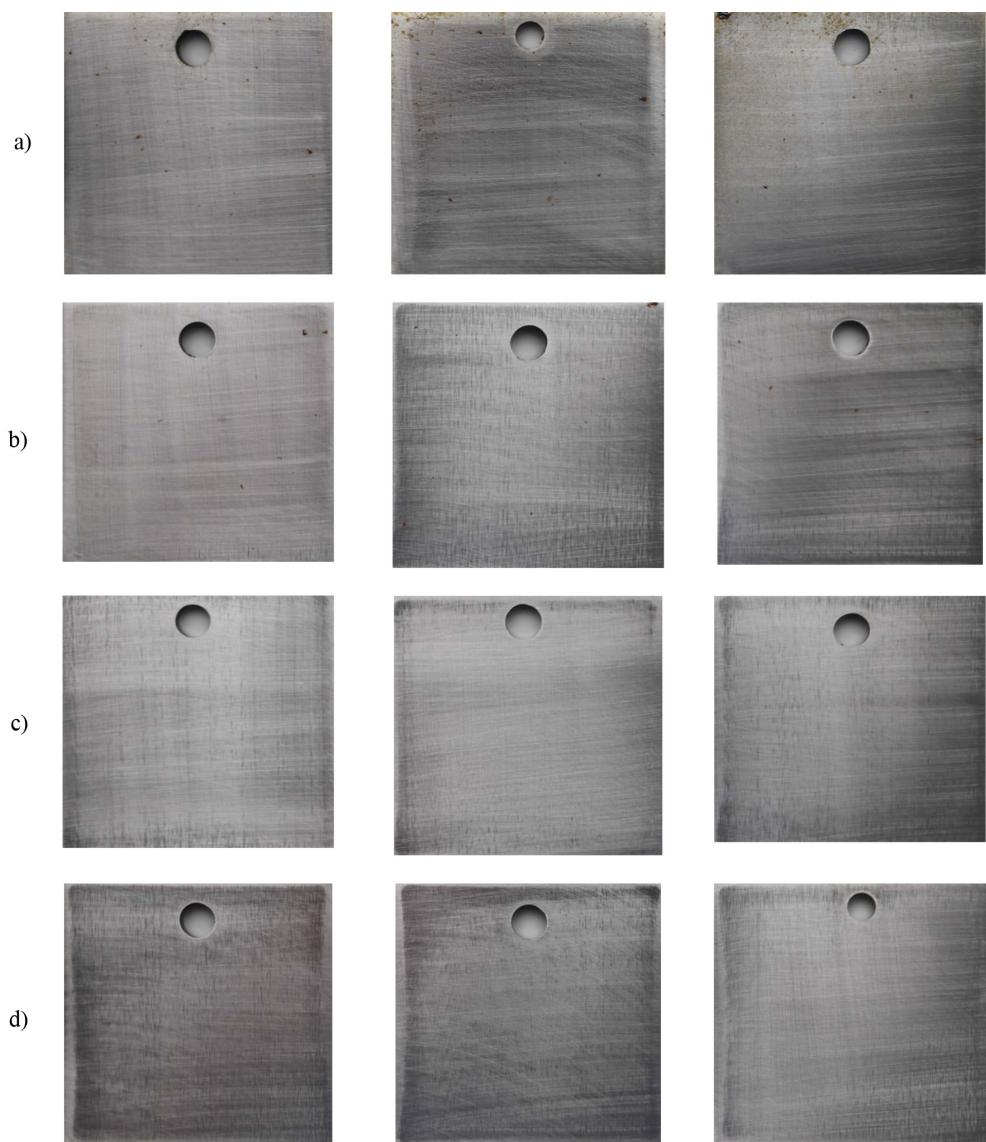
F i g. 5. Image of the surface of the St3 steel working electrode after electrochemical testing at various concentrations of V3:
a) control; b) 0.5%; c) 1.0%; d) 1.5%; e) 2.0%; f) 3.0%

Источник: фотографии для рисунков 5, 6 сделаны С. М. Гайдаром в Тропическом центре Социалистической Республики Вьетнам (10.12.2024 г.).

Source: the photos for figures 5 and 6 were taken during the study of S. M. Gaidar at the SVR Center on December 10, 2024.

Результаты испытаний методом ускоренного испытания на воздействие тепла и влаги с конденсацией влаги

Защитная способность от коррозии стали Ст3 ингибитором V3 при 100, 200, 300 г/м³ концентраций определялась методом ускоренных испытаний на воздействие тепла и влаги с конденсацией влаги.



Р и с. 6. Внешний вид образцов из стали Ст3 после ускоренных испытаний при различных концентрациях В3:

а) контроль; б) 100 г/м³; в) 200 г/м³; г) 300 г/м³

F i g. 6. Appearance of St3 steel samples after accelerated test at different V3 concentrations:
a) control; b) 100 g/m³; c) 200 g/m³; d) 300 g/m³

Результаты визуальной оценки показали, что на поверхности контрольных образцов появились первые признаки коррозии после двух циклов испытаний, после 20 циклов испытаний на поверхности образцов (рис. 6 а) образовались коррозионные пятна, коррозионные раковины, помутнение и потеря блеска; на поверхности испытуемых образцов при 100 г/м³ концентрации В3 первые очаги

коррозионного разрушения начали проявляться после 12 циклов, далее по окончании 20 циклов испытаний на образцах новых очагов не зафиксировано (рис. 6 б); на поверхности испытуемых образцов при 200 и 300 г/м³ концентрации V3 после 20 циклов испытаний нет признаков коррозии (рис. 6 с, д).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методики получения летучих ингибиторов коррозии черных металлов на основе этаноламина и борной кислоты, взятых в различных мольных соотношениях. Установлено, что наилучшую эффективность проявляет ингибитор, представляющий собой три(аминоэтил)борат (V3). Наибольший защитный эффект данное соединение показало в отношении стали Ст3.

Электрохимическая оценка защитной эффективности ЛИК на основе измерения поляризационных кривых в присутствии одного стимулятора коррозии коррелирует с результатами гравиметрических коррозионных испытаний. Высокая защитная эффективность позволяет применять полученный ингибитор для консервации изделий из черных и цветных металлов.

Несмотря на обширность рынка ингибиторов, создание новых защитных материалов не прекращается. Основной упор делается на универсальность защиты от атмосферной и микробиологической коррозии, а также на применение с широким спектром материалов и максимальным сроком действия. В связи с этим разработка новых современных составов, а также проведение лабораторных и натурных испытаний по определению их физико-химических и эксплуатационных свойств в условиях различного климата остается актуальным на сегодняшний день.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo Y., Rogov A., Hird A., Mingo B., Matthews A., Yerokhin A. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium by Sawtooth Pulse Current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surcoa.2021.127938>
2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y., Zhou X., Liu Y., Meng X. Recent Advances of Metal–Organic Frameworks in Corrosion Protection: From Synthesis to Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132823>
3. Al-Amriery A.A., Rubaye A.Y.I., Kadhum A.A.H., Al-Azzawi W.K. Thiosemicarbazide and Its Derivatives as Promising Corrosion Inhibitors: A Mini-Review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):597–620. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12>
4. Talat N.T., Dahadha A.A., Abunuwar M., Hussien A.A., Wafa'a Odeh. Polyethylene Glycol and Polyvinylpyrrolidone: Potential Green Corrosion Inhibitors for Copper in H₂SO₄ Solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(1):215–243. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-13>
5. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I.I., Kharytonau D.S. Corrosion Inhibition of Magnesium Alloy AZ31 in Chloride-Containing Solutions by Aqueous Permanganate. *Journal of Solid State Electrochem*. 2023;27:1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>
6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K., Gaaz T., Kadhum A.A.H., Shaker L.M. и др. The Corrosion Inhibition Abilities of PVA and PVP Against the Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):645–663. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14>
7. Gao H., Li Q., Dai Y., Luo F., Zhang H.X. High Efficiency Corrosion Inhibitor 8-Hydroxyquinoline and Its Synergistic Effect with Sodium Dodecylbenzenesulphonate on AZ91D Magnesium Alloy. *Corrosion Science*. 2010;52(5):1603–1609. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.033>

8. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова Е.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе бор органических соединений. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(6):21. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (дата обращения: 30.05.2025).
9. Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И., Посунько И.А., Пикина А.М. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(12):10–14. <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14>
10. Келлер С., Рейнхард Г. Упаковочные материалы, содержащие летучие ингибиторы коррозии. Принципы защиты. *Коррозия: материалы, защита*. 2015;(8):24–34. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2304 (дата обращения: 30.05.2025)
11. Данякин Н.В., Сигида А.А. Современные летучие ингибиторы атмосферной коррозии (обзор). *Auditorium*. 2017;1(13):131–137. URL: <https://auditorium.kursksu.ru/magazine/archive/number/66> (дата обращения: 30.05.2025)
12. Гончарова О.А., Лучкин А.Ю., Андреев Н.Н. Смесевые летучие ингибиторы коррозии черных металлов и универсальные препараты. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(2):33–40. <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-2-33-40>
13. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Шель Е.Ю., Шель Н.В., Князева Л.Г., Дорохов А.В., и др. Моделирование коррозионно-агрессивных атмосфер для оценки эффективности летучих ингибиторов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018;84(7):42–46. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-42-46>
14. Черемисина И.В. Защита металлов от атмосферной коррозии летучими ингибиторами. *Державинский форум*. 2018;2(6):151–159. <https://elibrary.ru/urjvde>
15. Зибер М., Лоутнер С., Фасбендер Ф. Метод испытания и устройство для оценки эффективности летучих ингибиторов коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(2):41–48. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3177 (дата обращения: 30.05.2025).
16. Трусов В.И. Некоторые итоги тензиметрического исследования летучих ингибиторов коррозии. *Журнал общей химии*. 2021;91(10):1479–1482. <https://doi.org/10.31857/S0044460X21100012>
17. Кузнецов Ю.И. Органические ингибиторы атмосферной коррозии. *Вестник ТГУ*. 2013;18(5):2126–2131. <https://elibrary.ru/qytsrf>
18. Гончарова О.А., Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Надькина Е.А. Формирование наноразмерных слоев на металле летучими органическими соединениями для повышения защиты от атмосферной коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2014;(6):20–26. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2026 (дата обращения: 30.05.2025).
19. Колядя Л.Г., Кремнева А.В. Изучение антикоррозионных свойств комбинированных упаковочных материалов для металлопродукции. *Теория и технология металлургического производства*. 2014;2(15):105–108. URL: <https://ttmp.magt.ru/doc/ttmp-2-2014.pdf> (дата обращения: 30.05.2025).
20. Андреев Н.Н., Гончарова О.А., Андреева Н.П., Максаева Л.Б., Петрунин М.А., Кузнецов Ю.И. Адсорбция паров летучего ингибитора ИФХАН-118 на железе и стали. *Коррозия: материалы, защита*. 2016;(2):28–31. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2393 (дата обращения: 30.05.2025).
21. Кузнецов Ю.И., Агафонкин А.В., Зель О.О. Летучие ингибиторы атмосферной коррозии металлов на основе азометинов. *Коррозия: материалы, защита*. 2009;(4):17–23. <https://elibrary.ru/kxjcxr>

REFERENCES

1. Guo Y., Rogov A., Hird A., Mingo B., Matthews A., Yerokhin A. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium by Sawtooth Pulse Current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surcoa.2021.127938>
2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y., Zhou X., Liu Y., Meng X. Recent Advances of Metal–Organic Frameworks in Corrosion Protection: From Synthesis to Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132823>

3. Al-Amiry A.A., Rubaye A.Y.I., Kadhum A.A.H., Al-Azzawi W.K. Thiosemicarbazide and Its Derivatives as Promising Corrosion Inhibitors: A Mini-Review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):597–620. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12>
4. Talat N.T., Dahadha A.A., Abunuwar M., Hussien A.A., Wafa'a Odeh. Polyethylene Glycol and Polyvinylpyrrolidone: Potential Green Corrosion Inhibitors for Copper in H₂SO₄ Solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(1):215–243. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-13>
5. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I.I., Kharytonau D.S. Corrosion Inhibition of Magnesium Alloy AZ31 in Chloride-Containing Solutions by Aqueous Permanganate. *Journal of Solid State Electrochem*. 2023;27:1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>
6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K., Gaaz T., Kadhum A.A.H., Shaker L.M., et al. The Corrosion Inhibition Abilities of PVA and PVP Against the Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):645–663. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14>
7. Gao H., Li Q., Dai Y., Luo F., Zhang H.X. High Efficiency Corrosion Inhibitor 8-Hydroxyquinoline and Its Synergistic Effect with Sodium Dodecylbenzenesulphonate on AZ91D Magnesium Alloy. *Corrosion Science*. 2010;52(5):1603–1609. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.033>
8. Levashova V.I., Yangirova I.V., Kazakova E.V. Review of Corrosion Inhibitor on the Based of Organobor on Compounds. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(6):21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (accessed 30.05.2025).
9. Gaidar S.M., Konoplev V.E., Petrovsky D.I., Posunko I.A., Pikina A.M. Investigation of the Synergistic Effect of Contact Inhibitors of Anodic and Cathodic Action in Protecting Steel from Corrosion. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(12):10–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14>
10. Keller S., Reinhard G. [Packaging Materials Containing Volatile Corrosion Inhibitors. Principles of Protection]. *Corrosion: Materials, Protection*. 2015;(8):24–34. (In Russ.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2304 (accessed 30.05.2025).
11. Danyakin N.V., Sigida A.A. Modern Atmospheric Volatile Corrosion Inhibitors (Overview) *Auditorium*. 2017;1(13):131–137. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://auditorium.kursksu.ru/magazine/archive/number/66> (accessed 30.05.2025).
12. Goncharova O.A. Luchkin A.Yu., Andreev N.N. Volatile Mix Corrosion Inhibitors of Ferrous Metals and Universal Preparations. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(2):33–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-2-33-40>
13. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel E.Yu., Shel N.V., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., et al. Modeling of Corrosive Atmospheres for Evaluation of the Efficiency of Volatile Inhibitors. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2018;84(7):42–46. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-42-46>
14. Cheremisina I.V. Protection of Metals Against Atmospheric Corrosion by Vapor-Phase Inhibitors. *Derzhavin Forum*. 2018;2(6):151–159. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/urjvde>
15. Sieber M., Lautner S., Fasbender F. Test Method and Device for Evaluation of Effective Volatile Corrosion Inhibitors. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(2):41–48. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3177 (accessed 30.05.2025)
16. Trusov V.I. Some Results of a Tensimetric Study of Volatile Corrosion Inhibitors. *Russian Journal of General Chemistry*. 2021;91(10):1479–1482. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0044460X21100012>
17. Kuznetsov Yu.I. Organic Inhibitors of Atmospheric Corrosion. *Vestnik TSU*. 2013;18(5):2126–2131. <https://elibrary.ru/qytsrf>
18. Goncharova O.A., Kuznetsov Yu.I., Andreev N.N., Nadkina E.A. Formation of Nanoscale Layers on Metal by Volatile Organic Compounds to Enhance Protection Against Atmospheric Corrosion. *Corrosion: Materials, Protection*. 2014;(6):20–26. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2026 (accessed 30.05.2025).
19. Kolyada L.G., Kremneva A.V. Study of Anticorrosive Properties of Combined Packaging Materials for Metal Products. *The Theory and Process Engineering of Metallurgical Production*.

- 2014;2(15):105–108. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://ttmp.magt.ru/doc/ttmp-2-2014.pdf> (accessed 30.05.2025).
20. Andreev N.N., Goncharova O.A., Andreeva N.P., Maksayeva L.B., Petrunin M.A., Kuznetsov Yu.I. Adsorption of Vapors of Volatile Inhibitor IFkHAN-118 on Iron and Steel. *Corrosion: Materials, Protection.* 2016;(2):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2393 (accessed 30.05.2025).
21. Kuznetsov Yu.I., Agafonkin A.V., Zel O.O. [Volatile Inhibitors of Atmospheric Corrosion of Metals Based on Azomethines]. *Corrosion: Materials, Protection.* 2009;(4):17–23. (In Russ.) <https://elibrary.ru/kxjcxr>

Об авторах:

Куанг Хоанг Дык, кандидат химических наук, докторант Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); заместитель директора по науке Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Южное отделение) (650000, Вьетнам, г. Ханой, Нгия До, Kay Зай, ул. Нгуен Ван Хуен, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: [57201699580](https://orcid.org/0000-0002-6487-8782), quanghoang1510@gmail.com

Гайдар Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); ведущий научный сотрудник Российской государственной университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, Researcher ID: [I-4723-2018](https://orcid.org/0000-0003-4290-2961), Scopus ID: [57191589797](https://orcid.org/0000-0003-4290-2961), techmash@rgau-msha.ru

Пикина Анна Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); старший научный сотрудник Российской государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>, Scopus ID: [57936447900](https://orcid.org/0000-0003-0237-0534), pikina@rgau-msha.ru

Лапсарь Оксана Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); научный сотрудник, Российской государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2883-8627>, Researcher ID: [OYF-5859-2025](https://orcid.org/0009-0005-2883-8627), olapsary@rgau-msha.ru

Нгуен Тхи Тху Суан, магистрант Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Южное отделение) (650000, Вьетнам, г. Ханой, Нгия До, Kay Зай, ул. Нгуен Ван Хуен, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-3396>, ngyuenthithuxuan92@gmail.ru

Вклад авторов:

Х. Д. Куанг – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

С. М. Гайдар – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. М. Пикина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования.

О. М. Лапсарь – осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Т. Т. С. Нгуен – осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 04.06.2025; поступила после рецензирования 11.09.2025;
принята к публикации 08.10.2025*

About the authors:

Hoang Duc Quang, PhD (Chem.), Doctoral Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Deputy Director for Science at the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center (South Branch) (650000, Vietnam, Hanoi, Nghia Do, Cau Zai, Nguyen Van Huyen St, 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

Sergey M. Gaidar, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Leading Researcher, The Kosygin State University of Russia (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, Scopus ID: **57191589797**, Researcher ID: **I-4723-2018**, techmash@rgau-msha.ru

Anna M. Pikina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Senior Researcher, The Kosygin State University of Russia (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>, pikina@rgau-msha.ru

Oksana M. Lapsar, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Researcher, The Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art) (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2883-8627>, olapsary@rgau-msha.ru

Thi Thu Xuan Nguyen, Master's Student, Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center (South Branch) (650000, Vietnam, Hanoi, Nghia Do, Cau Zai, Nguyen Van Huyen St, 63). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-3396>, nguyenthithuxuan92@gmail.ru

Authors contribution:

H. D. Quang – formulating the study idea, goals, and objectives; manuscript preparing: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by the research team members, including at the pre- and post-publication stages.

S. M. Gaidar – formulating the study idea, goals, and objectives; manuscript preparing: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by the research team members, including at the pre- and post-publication stages.

A. M. Pikina – conducting the study, including data collection; manuscript preparing: visualizing the study results.

O. M. Lapsar – conducting the study, including data collection; manuscript preparing: visualizing the study results and the data obtained.

T. T. X. Nguyen – conducting the study, including data collection; manuscript preparing preparation: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 04.06.2025; revised 11.09.2025; accepted 08.10.2025