



Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии

С. М. Гайдар¹, Р. К. Низамов¹, М. И. Голубев²,
И. Г. Голубев^{3*}

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
(г. Москва, Россия)

²Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Москва, Россия)

³ФГБНУ «Росинформагротех» (пос. Правдинский, Россия)

*golubev@rosinformagrotech.ru

Введение. В результате коррозионных повреждений сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин увеличиваются расходы на поддержание их работоспособности. Замедлить или приостановить процесс коррозии можно посредством водорастворимых ингибиторов, многие из которых, однако, имеют недостатки, такие как малоэффективность или токсичность. Целью настоящей работы является исследование защитной эффективности водных растворов эфира борной кислоты и триэтанолamina, а также разработка рекомендаций по их использованию для противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при подготовке к длительному хранению.

Материалы и методы. Защитные композиции были подготовлены путем растворения эфира борной кислоты и триэтанолamina в дистиллированной и технической воде при комнатной температуре. Для исследования использованы водные растворы с концентрацией водорастворимых ингибиторов 5–50 г/л (0,5–5 масс. %). Для оценки их защитной эффективности был применен метод линейного поляризационного сопротвления. В ходе электрохимических исследований использован измерительный комплекс фирмы Solartron (Великобритания). Ускоренные коррозионные испытания проводились на стальных пластинках в гигростате Г-4 по ГОСТ 9.054-75. «Эффект последствия» водорастворимых ингибиторов коррозии оценивался по защитной эффективности остаточной пленки.

Результаты исследования. Изучено влияние концентрации эфира борной кислоты и триэтанолamina в водных растворах на их защитные свойства. Установлено, что эфир борной кислоты и триэтанолamina замедляет анодную реакцию. Анализ результатов исследований показал, что при повышении концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Наиболее заметно это снижение при изменении концентрации в диапазоне 10–50 г/л. С ростом концентрации в растворе эфира борной кислоты и триэтанолamina до 50 г/л их защитная эффективность изменяется на 6–14 %. Получена оптимальная концентрация ингибитора в композиции – 10 г/л. При коррозионных испытаниях стальных пластин защитная эффективность раствора с концентрацией 10 г/л водорастворимого ингибитора составила > 70 %. При попадании

© Гайдар С. М., Низамов Р. К., Голубев М. И., Голубев И. Г., 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течении года следов коррозии не обнаружено.

Обсуждение и заключения. Исследования показали, что эфир борной кислоты и триэтаноламина является водорастворимым ингибитором коррозии анодного типа. С ростом концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Оптимальная концентрация эфира борной кислоты и триэтаноламина в защитном растворе должна составлять 10 г/л. При коррозионных испытаниях стальных пластин защитная эффективность раствора водорастворимого ингибитора составляла > 70 %. В условиях прямого попадания атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течении года не наблюдалось следов коррозии. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтаноламина эффективен для защиты от атмосферной коррозии в условиях закрытого помещения. На открытых площадках его рекомендуют применять для защиты машин от коррозии при кратковременном хранении. Определена область применения водорастворимого ингибитора при постановке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин на длительное хранение, в том числе предложено совместить стадии очистки машин от загрязнений и консервации их поверхностей для защиты от коррозии. Статья будет полезна специалистам в области защиты лесо- и сельскохозяйственной техники от коррозии при постановке на длительное хранение.

Ключевые слова: сельскохозяйственная машина, лесохозяйственная машина, коррозия, скорость коррозии, консервационный состав, водорастворимый ингибитор, эфир борной кислоты и триэтаноламина, поляризационная кривая, защитная эффективность

Для цитирования: Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии / С. М. Гайдар [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 429–444. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.429-444>

Protective Efficacy of Water-Soluble Corrosion Inhibitors

S. M. Gaydar¹, R. K. Nizamov¹, M. I. Golubev²,
I. G. Golubev^{3*}

¹*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)*

²*Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*

³*Rosinformagrotekh Federal State Budget Scientific Institution (Pravdinskiy, Russia)*

*golubev@rosinformagrotech.ru

Introduction. As a result of damage to agricultural and forestry machines from corrosion, the costs of maintaining their performance are increasing. The use of water-soluble inhibitors can slow or halt the destructive process. However, many of the inhibitors have disadvantages, for example, flammability or toxicity. The purpose of this work is to study the protective effectiveness of aqueous solutions of boric acid ester and triethanolamine and to develop recommendations for their use for anticorrosive protection of agricultural and forestry machinery in long-term storage.

Materials and Methods. Protective compositions were prepared by dissolving boric acid ester and triethanolamine in distilled and industrial water at room temperature. Aqueous solutions with a concentration of water-soluble inhibitors of 5–50 g/l (0.5–5 mass %) were used for research. The linear polarization resistance method was used to assess their



protective efficiency. Solartron (UK) measuring complex was used for electrochemical studies. Accelerated corrosion tests were carried out on steel plates according to GOST 9.054-75 in the g-4 humidistat. The aftereffect of water-soluble corrosion inhibitors was evaluated by the residual film protective efficiency.

Results. The influence of the concentration of the ester of boric acid and triethanolamine in aqueous solutions for their protective properties. It was found that boric acid and triethanolamine slow the anode reaction. The analysis of the research results showed that the corrosion rate of the steel electrode decreases with increasing the concentration of water-soluble inhibitor in process water. This decrease is most noticeable when the concentration in the range of 10–50 g/l with an increase in the concentration in the solution of boric acid and triethanolamine to 50 g/l, their protective efficiency varies by 6–14 %. The optimal concentration of the inhibitor in the composition is obtained, which is 10 g/l during corrosion tests of steel plates, the protective efficiency of the solution with a concentration of 10 g/l of the water-soluble inhibitor was more than 70 %. In case of precipitation on the samples, the protective efficiency of the solutions decreased to 20–25 %. When tested in a closed unheated room on steel samples during the year there were no traces of corrosion.

Conclusions. The study demonstrated that boric acid and triethanolamine is a water-soluble inhibitor of anodic corrosion. As the concentration of water-soluble inhibitor in process water increases, the corrosion rate of the steel electrode decreases. Optimum concentration of ester of boric acid and triethanolamine in the protective solution should be 10 g/l corrosion tests of steel plates, the shielding effectiveness of a solution of water-soluble inhibitor was more than 70 %. In conditions of direct exposure to atmospheric precipitation on the samples of the protective efficacy of the solutions were decreased to 20–25 %. When tested in a closed unheated room on steel samples during the year there were no traces of corrosion. Thus, the ester of boric acid and triethanolamine is effective to protect against atmospheric corrosion in a closed room. On open platforms it is recommended to be applied for protection of cars against corrosion at short-term storage. The scope of application of water-soluble inhibitor at statement of agricultural and forestry machines on long-term storage, including to combine stages of cleaning of cars from pollution and preservation of their surfaces for protection against corrosion is offered. The article will be useful to specialists in the field of protection of agricultural machinery from corrosion.

Keywords: agricultural and forestry machines, corrosion, corrosion rate, conservation compositions, water-soluble inhibitors, boric acid ester and triethanolamine, polarization curves, protective efficiency.

For citation: Gaydar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I., Golubev I. G. Protective efficacy of water-soluble corrosion inhibitors. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):429–444. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201803.429-444

Введение

На многих предприятиях и в организациях агропромышленного и лесного комплексов не соблюдаются правила хранения машин, некачественно выполняется их противокоррозионная защита. Большая часть сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин длительное время хранится на открытых площадках, в результате чего детали подверга-

ются коррозии. Наиболее подвержены коррозионным разрушениям резьбовые соединения, зубья звездочек, втулочно-роликовые цепи и др.¹⁻³ [1] (рис.1).

Для противокоррозионной защиты машин в России и за рубежом разработаны и выпускаются различные консервационные составы [2–5]. Одним из требований, которые положены в основу разработки перспективных консер-

¹ Гайдар С. М. [Технология хранения сельскохозяйственной техники](#). М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. 2016 с.

² Черноиванов В. И., Северный А. Э., Зазуля А. Н. [Сохраняемость и противокоррозионная защита техники в сельском хозяйстве](#). М. : ГОСНИТИ, 2010. 266 с.

³ Пучин Е. А., Гайдар С. М. [Хранение и противокоррозионная защита сельскохозяйственной техники](#). М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 511 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19518421>



Р и с. 1. Коррозионные разрушения зубьев звездочек и втулочно-роликовых цепей
 Fig. 1. Corrosion destruction of teeth of sprockets and bushing-roller chains

вационных материалов, должна быть их эффективная защитная способность⁴ [6]. Для этих целей перспективными являются пассиваторы и ингибиторы [7–12], однако многие из них имеют недостатки. В России и за рубежом для защиты деталей машин от коррозии применяются водорастворимые ингибиторы⁵ [13–16]. В качестве водорастворимого ингибитора предложен эфир борной кислоты и триэтанолamina. Синтез эфира происходит при реакции конденсации между борной кислотой и триэтанолamiном. Целью данной работы является исследование защитной эффективности водных растворов эфира борной кислоты и триэтанолamina, а также разработка рекомендаций по их использованию для противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при постановке на длительное хранение.

Обзор литературы

Замедлить коррозию поверхностей деталей машин можно путем затруднения анодной или катодной реакций пассиваторами и ингибиторами [7–12]. К ним относятся нитрит натрия, хроматы и дихроматы натрия и калия и др. В то же время следует отметить, что пассиваторы имеют недостатки: в частности, они токсичны. Большой интерес для защиты машин от коррозии, в том числе в закрытых помещениях, представляют водорастворимые ингибиторы; они пожаробезопасны и нетоксичны. В России и за рубежом в качестве водорастворимых ингибиторов широкое применение получили органические соединения и их смеси, которые воздействуют на скорость катодной и анодной реакций⁶ [13–14]. Основу таких ингибиторов составляют фосфаты этанолamiнов, полифосфат натрия и другие соединения⁷.

⁴ Голубев М. И. [Методические подходы к выбору консервационных материалов для противокоррозионной защиты лесных машин при их хранении](#) // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : мат-лы IX Междунар. науч.-практ. конф. «ИнформАгро-2017». 2017. С. 517–521.

⁵ Гайдар С. М. [Теория и практика создания ингибиторов коррозии для консервации сельскохозяйственной техники](#) : монография. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2011. 304 с.

⁶ Там же.

⁷ Там же.



В последние годы, в том числе за рубежом, особое внимание в исследованиях уделяется ингибиторам коррозии на основе аминов [15–18]. В работе В. И. Левашовой, И. В. Янгировой и Е. В. Казаковой установлено, что использование борорганических соединений в качестве компонентов ингибиторов коррозии позволяет увеличить защитный эффект композиции, а также снизить себестоимость ингибитора за счет уменьшения затрат на синтез [16].

В работах С. М. Гайдара и Ю. И. Кузнецова⁸ [17–18] рассмотрены результаты коррозионных и электрохимических исследований структурных особенностей поверхностных слоев на металлах, защищаемых различными физико-химическими методами. В работах В. И. Вигдоровича и соавт. изучены кинетика и механизм электродных реакций при коррозии ряда металлов, покрытых масляными пленками в различных средах [19–20]. В работе В. В. Быкова, М. И. Голубева и Е. Г. Кузнецовой приведены результаты электрохимических исследований консервационных составов на основе растительных и минеральных масел [21]. В результате выполненного обзора установлено, что эфир борной кислоты и триэтанолamina обладает более высокими защитными свойствами, чем соответствующие эфиры борной кислоты и аминоспиртов [22–23]. Его более высокая защитная способность по сравнению с аминоспиртами объясняется образованием на поверхности металла более плотной молекулярной пленки, обладающей большей защитной способностью [24]. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтанолamina можно использовать как водорастворимый ингибитор для защиты машин от атмосферной коррозии при их кратковременном и длительном хранении.

Материалы и методы

Для получения исследуемого раствора эфир борной кислоты и триэтанолamina был растворен в водопровод-

ной и дистиллированной воде при комнатной температуре. В ходе исследований использованы композиции концентрацией (С) 5–50 г/л (0,5–5,0 масс. %). Для оценки их защитных свойств был использован метод линейного поляризованного сопротивления. С помощью коррозиметра «Эксперт-001» была наложена поляризация 10 мВ на рабочий электрод, а также измерен ток коррозии. Были использованы электроды из стали Ст3, зачищенные и обезжиренные ацетоном перед опытом. Продолжительность испытаний в ингибированных растворах и при измерении эффекта последействия составляла от 5 мин до 24 ч. Электрохимические исследования проводились на измерительном комплексе фирмы Solartron (Великобритания), включающем анализатор импеданса SI 1255 и потенциостат SI 1287. Для опытов была использована трехэлектродная электрохимическая ячейка из стекла «Пирекс», у которой анодное и катодное пространство разделено шлифом. В качестве рабочего электрода служила углеродистая сталь Ст3. Вспомогательным электродом служила гладкая платина, в качестве электрода сравнения был использован насыщенный хлоридсеребряный электрод. Электроды выдерживались в растворе 10–15 мин после их погружения для установления квазистационарного потенциала.

Потенциалы были пересчитаны по нормальной водородной шкале. Для пересчета данных в весовые единицы проводилась экстраполяция линейных тафелевых катодных и анодных участков на потенциал коррозии с последующей оценкой тока коррозии использовалась формула

$$K = \gamma i_{\text{кор}}$$

где K – скорость коррозии (г/м²час); γ – электрохимический эквивалент железа с учетом его перехода в раствор (окис-

⁸ Там же.

ление) в виде Fe^{2+} (г/А·час); $i_{кор}$ – ток коррозии (А/м²).

Поляризация проводилась сразу после установления квазистационарного потенциала рабочего электрода в растворе. Если на катодной поляризационной кривой отсутствовали четкие протяженные тафелевские участки, $i_{кор}$ оценивали по точке пересечения соответствующего участка анодной поляризационной кривой с прямой, параллельной оси токов и выходящей из ординаты $E_{кор}$. Поляризационные измерения проводились в водопроводной воде с добавлением ВИК заданной концентрации.

Для ускоренных коррозионных испытаний, которые проводились в водных средах, были использованы прямоугольные пластины размером 60×30×3 мм⁹. Перед опытами они были зачищены, отполированы, обезжирены ацетоном и спиртом, высушены и взвешены на аналитических весах с точностью измерения до $1 \cdot 10^{-4}$ г. При опытах объем раствора составлял не менее 15 см³ на 1 см² площади образца. Продолжительность опытов составляла 14 сут. После экспозиции образцы были протравлены, промыты водой, высушены фильтровальной бумагой и обработаны ластиком.

Скорость коррозии (K) оценивали по потерям массы образцов по формуле (2):

$$K = \frac{\Delta m}{S\tau} \quad (2)$$

где Δm – потери массы образцов в процессе эксперимента, г; S – видимая площадь поверхности образца, м²; τ – время экспозиции, час.

Эффективность ВИК оценивали по защитному действию (Z) по формуле (3):

$$Z = \frac{K_0 - K_{инг}}{K_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

где K_0 и $K_{инг}$ – скорость коррозии в неингибированном и ингибированном растворах соответственно.

Защитные свойства ингибитора оценивались по результатам ускоренных коррозионных испытаний, проводимых в соответствии с ГОСТ 9.054-75¹⁰ в гигростате Г-4 с автоматическим регулированием параметров влажности и температуры, с периодической конденсацией влаги на образцах. Площадь коррозионного поражения определялась по ГОСТ 9.041-74¹¹. Эффект последствия ВИК оценивался по защитной эффективности остаточной пленки ингибированного раствора на образце после сушки с последующей 14-дневной экспозицией в водопроводной и дистиллированной воде [25]. Натурные испытания образцов проводились в условиях открытой атмосферы и в неотапливаемом помещении.

Результаты исследования

Испытания СтЗ в ингибированных растворах по методу линейного поляризационного сопротивления показали уменьшение скорости коррозии в течение 30 мин и последующей ее стабилизацией, что связано с формированием на электроде оксидной пленки с участием ВИК. В ходе противокоррозионной защиты сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин при постановке на хранение на стадии очистки или межоперационной консервации не предусмотрен длительный контакт с ингибированным водным раствором. Поэтому важен так называемый «эффект последствия», который пока-

⁹ Там же.

¹⁰ ГОСТ 9.054-75. Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности.

¹¹ ГОСТ 9.509-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности.



зывает эффективность влияния предварительного контакта металлической поверхности с водным раствором ингибитора на протекание коррозии на ней. Исследования показали, что после выдерживания образцов в ингибированных водных растворах в течение 24 ч наблюдается сначала резкое уменьшение скорости коррозии стали, а затем ее стабилизация. Изменение концент-

рации ВИК в композиции от 5 до 10 г/л практически не сказывается на изменении скорости коррозии стали. С повышением концентрации водорастворимых ингибиторов коррозии до 50 г/л в воде их защитная эффективность изменяется на 6–14 % (табл. 1)

Анализ результатов электрохимических измерений (табл. 2) и поляризационных кривых (рис. 2) показал,

Т а б л и ц а 1

Table 1

Зависимость защитной эффективности ингибитора от концентрации в растворе технической воды и продолжительности испытаний Ст.3 по методу линейного поляризационного сопротивления

Dependence of inhibitor protective effectiveness on concentration in the process water solution and duration of St3 steel tests by linear polarization resistance method

Продолжительность испытаний от начала коррозионного процесса, мин / Duration of tests from beginning of corrosion process, min	Концентрация ингибитора, г/л / Inhibitor concentration, g/l		
	5	10	50
	Z	Z	Z
5	65	65	79
10	66	67	82
20	68	70	85
30	70	71	86
60	74	74	85
120	77	80	84
180	79	81	85
240	80	81	84
300	81	82	85
360	82	84	85
1 440	88	89	92

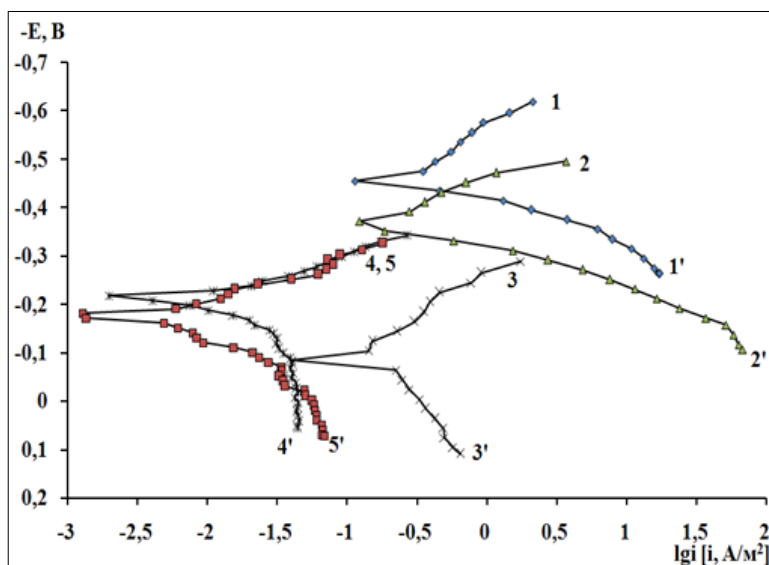
Т а б л и ц а 2

Table 2

Результаты электрохимических измерений скорости коррозии стали Ст3 в ингибированных ВИК водных растворах

Results of electrochemical measurements of corrosion rate of St3 steel in inhibited of water-soluble inhibitor aqueous solutions

Концентрация, г/л / Concentration, g/l	$-E_{кор}$, В / $-E_{кор}$, V	$i_{кор}$, А/м ² / $i_{кор}$, A/m ²	b_k , мВ / b_k , mV	b_a , мВ / b_a , mV	$K_{з/х} \cdot 10^{-4}$, кг/м ² ч / $K_{з/х} \cdot 10^{-4}$, kg/m ² h	Z, %
1	0,37	0,177	120	60	1,84	30
5	0,09	0,141	180	200	1,46	44
10	0,21	0,006	70	100	0,07	97
50	0,18	0,004	70	100	0,04	98



Р и с. 2. Катодные (1–5) и анодные (1’–5’) поляризационные кривые стали Ст3 в технической воде (1,1’), ингибированной ВИК (2,2’–5,5’). Концентрация ВИК, г/л: 2,2’–1,0; 3,3’–5,0; 4,4’–10,0; 5,5’–50,0

F i g. 2. Cathode (1–5) and anode (1’–5’) polarization curves of St3 steel in process water (1,1’), inhibited of water-soluble inhibitor (2,2’–5,5’). Water-soluble inhibitor concentration, g/l: 2,2’–1,0; 3,3’–5,0; 4,4’–10,0; 5,5’–50,0

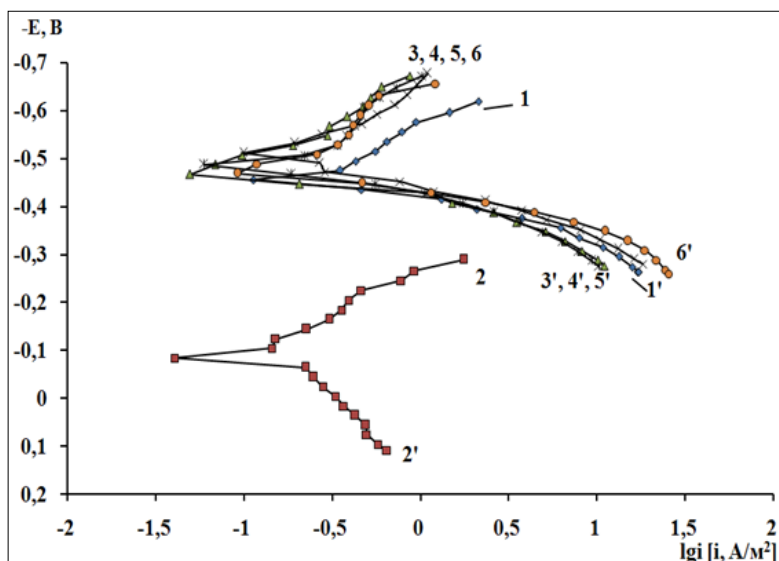
что с повышением концентрации ВИК в технической воде скорость коррозии стального электрода снижается. Наиболее заметно это снижение при изменении концентрации в диапазоне 10–50 г/л. Установлено, что эфир борной кислоты и триэтаноламина является ингибитором анодного типа.

Исследования показали, что при кратковременном контакте металлической поверхности с ингибированным водным раствором обеспечивается высокий «эффект последствия» (рис. 3). Анализ поляризационных кривых показал, что для получения высокого «эффекта последствия» достаточен предварительный пятиминутный контакт стальных пластин с водным раствором, содержащим 5–10 г/л исследуемого водорастворимого ингибитора. Таким образом, при проведении лабораторных исследований необходим только контакт металлических образцов с ингибированным водным раство-

ром в течение 5 мин, а при натуральных испытаниях достаточно лишь ополаскивания металлических поверхностей.

Коррозионные испытания образцов из Ст3 показали, что оптимальная концентрация ВИК в растворе технической воды составляет 10 г/л. Использование более высоких концентраций ингибитора в растворах нецелесообразно, т. к. при этом не происходит существенного повышения их защитных свойств. При испытаниях в технической воде защитная эффективность выше, чем в дистиллированной, что объясняется различием *pH* воды, а также структурой и концентрацией солей (табл. 3).

При коррозионных испытаниях исследована зависимость продолжительности соприкосновения стальных поверхностей с ингибированными растворами с последующим определением скорости протекания коррозионных процессов. Увеличение продолжительности предварительной выдержки



Р и с. 3. Катодные (1–6) и анодные (1'–6') поляризационные кривые стали Ст3 в технической воде (1,1'); ингибированной ВИК (2,2'–5,5'); выдержанные в ингибированном растворе, час: 3,3'–0,083; 4,4'–1; 5,5'–2; 6,6'–24

Fig. 3. Cathode (1–6) and anode (1'–6') polarization curves of St3 steel in industrial water (1,1'); inhibited of water-soluble inhibitor (2,2'–5,5'); decorated in inhibited solution, hour: 3,3'–0,083; 4,4'–1; 5,5'–2; 6,6'–24

Таблица 3

Table 3

Защитная эффективность ВИК при выдерживании образцов в течении часа в растворах дистиллированной и технической воды (%)

Protective efficacy of water-soluble inhibitor while maintaining the samples for one hour in solutions of distilled water and process water (%)

Номер п/п / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / concentration of inhibitor in solution, g/l	Вода / Water	
		Дистиллированная / Distilled	Техническая / Technical
1	5	34	53
2	10	35	61
3	50	27	65
4	100	27	65

стальных пластин в ингибированных растворах не приводит к существенному возрастанию их защитной эффективности (табл. 4)

Наибольший эффект последствия наблюдается при однократном опускании стальных пластин в водные

растворы, ингибированные ВИК. Оптимальная концентрация ВИК составляет в этом случае 10 г/л (табл. 5).

По данным ускоренных коррозионных испытаний в гигростате Г-4, защитная эффективность ингибиторов особенно заметно повышается при

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Защитная эффективность ВИК при выдерживании образцов в растворе технической воды (%)
Protective efficacy of water-soluble inhibitor while maintaining the samples in the solution of process water (%)

Номер пп / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Продолжительность выдерживания образцов в растворе, час / Holding time of samples in solution, hour	
		1	24
1	5	53	54
2	10	61	62
3	50	65	66
4	100	65	66

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Защитная эффективность ВИК при окунании образцов в раствор технической воды (%)
Protective efficacy of water-soluble inhibitor when dipping the samples in a solution of process water (%)

Номер пп / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Количество окунаний образцов в раствор, разы / Number of immersion of samples in solution	
		1	2
1	5	71	68
2	10	75	70
3	50	76	71
4	100	73	73

увеличении их концентрации в диапазоне от 5 до 10 г/л. (табл. 6). Увеличение продолжительности выдерживания стальных образцов в ингибированных растворах приводит к незначительному увеличению защитной эффективности. После выдерживания стальных образцов в ингибированных растворах в течение 1 ч оптимальной концентрацией ВИК в технической воде следует считать 10 г/л. Дальнейшее ее повышение не приводит к существенному повышению защитных свойств ингибированных растворов.

Натурные испытания стальных образцов проводились в условиях открытой атмосферы и в закрытом неотапливаемом помещении. Перед испытаниями сталь-

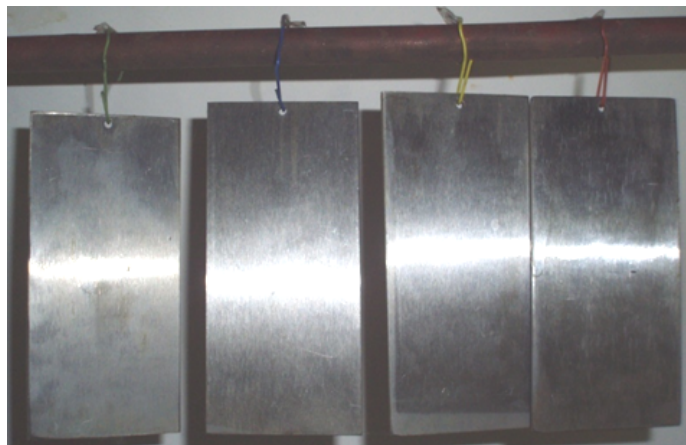
ные пластины выдерживались в течение 1 ч в водном растворе с концентрацией ингибитора 10 г/л. При испытаниях в условиях открытой атмосферы через 9 мес на стальных образцах появились следы коррозии. По нашему мнению, это связано с тем, что с течением времени происходит смывание защитной пленки атмосферными осадками. При испытаниях в условиях неотапливаемого помещения следов коррозии на образцах в течение 1 года визуально не наблюдалось (рис. 4).

Таким образом, при подготовке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин к длительному хранению можно использовать водорастворимый ингибитор в моющих растворах



Зависимость защитной эффективности ВИК от их концентрации и продолжительности выдерживания образца в растворе технической воды (%)
Dependence of protective efficiency of water-soluble inhibitor on their concentration and duration of exposure of the sample in process water solution (%)

Номер пп / Number	Концентрация ингибитора в растворе, г/л / Concentration of inhibitor in solution, g/l	Продолжительность выдерживания образца в растворе, ч / Duration of sample retention in solution, h	
		1	24
1	5	69	73
2	10	72	76
3	15	72	77
4	20	72	78
5	25	72	79
6	30	73	80
7	35	73	80
8	40	74	81
9	45	74	81
10	50	74	81



Р и с. 4. Внешний вид образцов после натуральных испытаний

Fig. 4. Appearance of samples after full-scale tests

и совмещать стадию очистки машин от загрязнений и консервацию их поверхностей для защиты от коррозии.

Обсуждение и заключения

Исследования показали, что эфир борной кислоты и триэтанолamina является ВИК анодного типа. С ростом концентрации ВИК в технической воде

скорость коррозии стального электрода снижается. Оптимальная концентрация эфира борной кислоты и триэтанолamina в защитном растворе должна составлять 10 г/л. В ходе коррозионных испытаний стальных пластин защитная эффективность раствора водорастворимого ингибитора составляла более

70 %. В условиях прямого попадания атмосферных осадков на образцы защитная эффективность растворов снижалась до 20–25 %. При испытаниях в закрытом неотапливаемом помещении на стальных образцах в течение 1 года не наблюдалось следов коррозии. Таким образом, эфир борной кислоты и триэтаноламина эффективен для защиты от атмосферной коррозии в условиях закрытого помещения. На

открытых площадках его рекомендуется применять для защиты машин от коррозии при кратковременном хранении. Предложено применять водорастворимый ингибитор при подготовке сельскохозяйственных и лесохозяйственных машин к длительному хранению, в том числе следует совмещать стадии очистки машин от загрязнений и консервации их поверхностей для защиты от коррозии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Быков В. В., Голубев М. И.** Мониторинг условий хранения машин лесного хозяйства // Наука в центральной России. 2014. Т. 9, № 3. С. 14–18. URL: <http://vniitin.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf>
2. К вопросу эффективности хранения сельскохозяйственной техники / Л. Г. Князева [и др.] // Наука в центральной России. 2017. Т. 30, № 6. С. 37–49. URL: <http://vniitin.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf>
3. Устройство для приготовления защитных составов при консервации сельскохозяйственной техники / Е. Б. Миронов [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 4. С. 490–498. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201604.490-498>
4. **Гайдар С. М., Пыдрин А. В., Карелина М. Ю.** Технология консервации автотракторных дизелей рабоче-консервационным составом // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. 2015. Т. 3, № 1 (12). С. 130–144. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272122>
5. **Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I.** Conception of corrosion inhibiting factors creation with the usage of nanotechnological approach // Scientific Israel – Technological Advantages. 2012. Vol. 14, no. 3. P. 88–91. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28978056>
6. **Гайдар С. М., Низамов Р. К., Голубев М. И.** Концепция создания ингибиторов коррозии с использованием нанотехнологических подходов. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. Т. 90, № 7. С. 140–142. URL: <http://les-vest.msfu.ru/contentst.shtml>
7. Теория и практика создания ингибиторов атмосферной коррозии / С. М. Гайдар [и др.] // Техника и оборудование для села. 2012. № 4. С. 8–10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17683616>
8. **Петровская Е. А., Гайдар С. М.** Влияние полифункциональных ингибиторов на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей в условиях агрессивных сред в АПК // Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2016. № 288-4. С. 258–261. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32548863>
9. **Бережная А. Г., Иващенко О. А., Чернявина В. В.** Подсолнечный и рапсовый лецитины как ингибиторы коррозии стали // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8 (ч. 3). С. 365–369. URL: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10035>
10. Влияние состава ингибирующей композиции на защитные свойства при углекислотной коррозии стали / А. Г. Бережная [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 9. С. 32–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24105466>
11. Application of ifhan-118 volatile inhibitor to protect agricultural equipment against atmospheric corrosion / V. I. Vigdorovich [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2016. Vol. 42, no. 2. P. 196–199. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367416020208>
12. Патент 2597442 Российская Федерация. Ингибитор коррозии металлов / С. М. Гайдар, М. Ю. Карелина, А. В. Пыдрин, Д. И. Петровский, Е. А. Петровская, Е. В. Быкова,



К. В. Быков, М. И. Голубев, А. Е. Шлыков. Опубл. 15.04.2015. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/259/2597442.html>

13. Кузнецов Ю. И. Органические ингибиторы коррозии: где мы находимся? Обзор. Ч. II. Пассивация и роль химической структуры карбоксилатов // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 2. С. 1–12. URL: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n-1/20171.pdf>

14. Консервационные составы на основе водорастворимых ингибиторов коррозии / Е. Г. Кузнецова [и др.] // Наука в центральной России. 2013. № 5. С. 43–47. URL: [http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%20\(13\)-15/ncr%205-13/КУЗНЕЦОВА%20Е.Г.,%20КНЯЗЕВА%20Л.Г.,%20ПРОХОРЕНКОВ%20Д.,%20ГАЙДАР.pdf](http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%20(13)-15/ncr%205-13/КУЗНЕЦОВА%20Е.Г.,%20КНЯЗЕВА%20Л.Г.,%20ПРОХОРЕНКОВ%20Д.,%20ГАЙДАР.pdf)

15. Гайдар С. М., Петровский Д. И., Посунько И. А. Борные производные аминов в качестве водорастворимых ингибиторов коррозии // Коррозия: материалы, защита. 2017. № 12. С. 27–35. URL: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n12/201712.pdf>

16. Левашова В. И., Янгирова И. В., Казакова Е. В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 10–17. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

17. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2017. Vol. 6, no. 4. P. 384–427. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-4-3>

18. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part II. Passivation and the role of chemical structure of carboxylates // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2016. Vol. 5, no. 4. P. 282–318. URL: https://www.researchgate.net/publication/310433287_Organic_corrosion_inhibitors_where_are_we_now_A_review_Part_II_Passivation_and_the_role_of_chemical_structure_of_carboxylates

19. Kinetics and mechanism of electrode reactions in corrosion of some metals covered with oil films in acid and neutral chloride environments / V. I. Vigdorovich [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2016. Vol. 52, no. 7. P. 1157–1165. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>

20. Oil-based preservative materials for protection of copper against corrosion in atmospheres containing SO₂ / V. I. Vigdorovich [et al.] // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2015. Vol. 4, no. 3. P. 210–220. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-3-210-220>

21. Быков В. В., Голубев М. И., Кузнецова Е. Г. Результаты электрохимических исследований консервационных составов на основе растительных и минеральных масел // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 119. С. 39–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23766478>

22. Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии при консервации сельскохозяйственной техники / Е. Г. Кузнецова [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 6. С. 23–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21628102>

23. Кинетика и механизм электродных реакций, протекающих в процессах коррозии ряда металлов, покрытых масляными пленками, в кислых и нейтральных хлоридных средах / В. И. Видгорович [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 4. С. 22–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23250202>

24. Патент 2355820 Российская Федерация. Водорастворимый ингибитор коррозии металлов / С. М. Гайдар. Заявл. 4.11.2008; опубл. 20.05.09. Бюл. № 14. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2355820>

25. Защитная эффективность ингибированных масляных пленок при коррозии углеродистой стали в растворах NaCl, содержащих сернистую кислоту / П. Н. Бернацкий [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 10. С. 24–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24295022>

Поступила 24.04.2018; принята к публикации 20.06.2018; опубликована онлайн 20.09.2018

Об авторах:

Гайдар Сергей Михайлович, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: I-4723-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Низамов Руслан Каримович, ассистент кафедры материаловедения и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, Researcher ID: I-4768-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1671-6970>, techmash@rgau-msha.ru

Голубев Михаил Иванович, доцент кафедры ЛТ-4, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (141005, Россия, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: Q-7109-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7693-8818>, mgolubev@mgu.ac.ru

Голубев Иван Григорьевич, заведующий отделом научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК, ФГБНУ «Росинформагротех» (141260, Россия, пос. Правдинский, ул. Лесная, д. 60) доктор технических наук, профессор, Researcher ID: I-3905-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>, golubev@rosinformagrotech.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. М. Гайдар – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение теоретических и экспериментальных исследований; патентный анализ, формирование выводов, исследования и доработка текста; Р. К. Низамов – проведение экспериментальных исследований, обработка данных; М. И. Голубев – проведение экспериментальных исследований; литературный анализ, перевод на английский, доработка текста; И. Г. Голубев – проведение критического анализа, обобщение результатов исследований, обзор российских и зарубежных исследований по теме статьи, подготовка начального варианта текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bykov V. V., Golubev M. I. Monitoring of the storage conditions of forestry machines. *Nauka v sentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2014; 9(3):14–18. Available at: <http://vniitin.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf> (In Russ.)
2. Knyazeva L. G., Petrashev A. I., Prokhorenkov V. D., Klepikov V. V. To the question of efficiency of storage of agricultural machinery. *Nauka v sentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2017; 30(6):37–49. Available at: <http://vniitin.ru/wp-content/uploads/2018/05/%E2%84%963-2014.pdf> (In Russ.)
3. Mironov E. V., Lisunov Ye. A., Krupin A. E., Tarukin E. M. A device for making protective compounds at the agricultural equipment conservation. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 26 (4):490-498. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201604.490–498 (In Russ.)
4. Gaydar S. M., Pydrin A. V., Karelina M. Yu. Preservation technology automotive diesel engines-preserved composition. *Aktualnyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Researches of 21st Century: Theory and Practice. 2015; 3(1):130-144. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23272122> (In Russ.)
5. Gaidar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I. Conception of corrosion inhibiting factors creation with the usage of nanotechnological approach. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012; 14(3):88–91. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28978056>
6. Gaydar S. M., Nizamov R. K., Golubev M. I. Concept of creating corrosion inhibitors using nanotechnology approaches. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* =



Moscow State Forest University Bulletin – Forest Bulletin. 2012; 90(7):140–142. Available at: <http://les-vest.msfu.ru/content.shtml> (In Russ.)

7. Gaydar S. M., Nizamov R. K., Guryanov S. A., Golubev M. I. Theory and practice of creating atmospheric corrosion inhibitors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Areas. 2012; 4:8–10. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17683616> (In Russ.)

8. Petrovskaya E. A., Gaydar S. M. Influence of multifunctional inhibitors on corrosion resistance of low-carbon steels in aggressive environments in agriculture. *Doklady Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Reports of Timiryazev Agricultural Academy. 2016; 288-4:258–261. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32548863> (In Russ.)

9. Berezhnaya A. G., Ivashchenko O. A., Chernyavina V. V. Sunflower and rapeseed lecithins as corrosion inhibitors of steel. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2016; 8(3):365–369. Available at: <http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10035> (In Russ.)

10. Berezhnaya, A. G., Chernavina V. V., E. A. Kiyantsa, Mishurov V. I., Markosyan A. A. Influence of the composition of the inhibiting composition on the protective properties of in carbon-dioxide steel corrosion. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: materials, protection. 2015; 9:32–35. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24105466> (In Russ.)

11. Vigdorovich V. I., Knyazeva L. G., Zazulya A. N., Kuznetsova E. G., Andreev N. N., Uryadnikov A. A., Dorokhov A. V. Application of Ifhan-118 volatile inhibitor to protect agricultural equipment against atmospheric corrosion. *Russian Agricultural Sciences*. 2016; 42(2):196–199. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068367416020208>

12. Russian Federation Patent 2597442. Metal Corrosion Inhibitor. Gaydar S. M., Karelina M. Yu., Pydrin A. V., Petrovskiy D. I., Petrovskaya Ye. A., Bykova Ye. V., Bykov K. V., Golubev M. I., Shlykov A. Ye. Published 15.04.2015. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/259/2597442.html> (In Russ.)

13. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2018; 2:1–12. Available at: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n-1/20171.pdf> (In Russ.)

14. Kuznetsova E. G., Knyazeva L. G., Prokhorenkov V. D., Gaidar S. M. Conservation compositions based on water-soluble corrosion inhibitors. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* = Science in Central Russia. 2013; 5:43–47. Available at: [http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%201\(13\)-15/ncr%205-13/KV3HEЦOBA%20E.Г.%20KHЯЗEBA%20Л.Г.%20ΠPOXOΠEHKOB%20B.Д.%20ΓAЙДAP.pdf](http://nf-innovate.com/content/files/ncr/ncr%201(13)-15/ncr%205-13/KV3HEЦOBA%20E.Г.%20KHЯЗEBA%20Л.Г.%20ΠPOXOΠEHKOB%20B.Д.%20ΓAЙДAP.pdf) (In Russ.)

15. Gaydar S. M., Petrovskiy D. I., Posunko I. A. Boric derivatives of amines as a water-soluble inhibitors of corrosion. *Korroziya: materialy, zashchita* = Corrosion: Materials, Protection. 2017; 12:27–35. Available at: <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/korroziya-materialy-zashchita/korroziya-materialy-zashchita-2017-n12/201712.pdf> (In Russ.)

16. Levashova V. I., Yangirova I. V., Kazakova Ye. V. Review of corrosion inhibitors based on boron compounds. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education. 2014; 6:10–17. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (In Russ.)

17. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part IV. Passivation and the role of mono- and diphosphonates. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2017; 6(4):384–427. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2017-6-4-3>

18. Kuznetsov Yu. I. Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part II. Passivation and the role of chemical structure of carboxylates. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2016; 5(4):282–318. Available at: https://www.researchgate.net/publication/310433287_Organic_corrosion_inhibitors_where_are_we_now_A_review_Part_II_Passivation_and_the_role_of_chemical_structure_of_carboxylates

19. Vigdorovich V. I., Knyazeva L. G., Kuznetsova E. G., Tsygankova L. E., Uryadnikov A. A., Shel N. V. Kinetics and mechanism of electrode reactions in corrosion of some metals covered with oil films in acid and neutral chloride. *Environments. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2016; 52(7):1157–1165. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205116070170>

20. Vigdorovich V. I., Shel N. V., Tsygankova L. E., Bernatsky P. N. Oil-based preservative materials for protection of copper against corrosion in atmospheres containing SO₂. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2015; 4(3):210–220. DOI: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-3-210-220>
21. Bykov V. V., Golubev M. I., Kuznetsova Ye. G. Results of electrochemical studies of preservative compositions based on vegetable and mineral oils. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2015; 119:39–42. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23766478> (In Russ.)
22. Kuznetsova E. G., Prokhorenkov V. D., Knyazeva L. G., A. I. Petrashev, Gaidar S. M. Protective efficacy of water soluble corrosion inhibitors in conservation of agricultural machinery. *Tekhnika v selskom khozyaystve = Machinery in Agriculture*. 2012; 6:23–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21628102> (In Russ.)
23. Vigdorovich V. I., Tsygankova L. E., Shel N. Oh. Knyazeva L. G., Uryadnikov A. A., Kuznetsova E. G. Kinetics and mechanism of electrode reactions occurring in the corrosion processes of a number of metals coated with oil films in acidic and neutral chloride media. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: Materials, Protection*. 2015. 4:22–30. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23250202> (In Russ.)
24. Russian Federation Patent 2355820. Water-soluble corrosion inhibitor of metals. Author: Gaydar S. M. Declared 4.11.2008; published 20.05.09. Bulletin no. 14. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2355820> (In Russ.)
25. Bernatsky P. N., Shel N. O., Vigdorovich V. I., Tsygankova L. E., Kotina A. Yu. Protective efficiency of inhibited oil films during corrosion of carbon steel in NaCl solutions containing sulfuric acid. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: Materials, Protection*. 2015; 10:24–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24295022> (In Russ.)

Received 24.04.2018; revised 20.06.2018; published online 20.09.2018

About authors:

Sergey M. Gaydar, Head of the Chair of Materials Science and Machine Building Technology, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: I-4723-2018; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, techmash@rgau-msha.ru

Ruslan K. Nizamov, Assistant, Chair of Materials Science and Machine Building Technology Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: I-4768-2018, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1671-6970>, techmash@rgau-msha.ru

Mikhail I. Golubev, Associate Professor, MT-3MF Department, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University (1, 1st Institutskaya St. Mytishchi 141005, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Q-7109-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7693-8818>, golubev@mgul.ac.ru

Ivan G. Golubev, Head of the Department of Scientific and Information Support of Innovative Development, Federal State Budget Scientific Institution «Rosinformagrotekh» (60, Lesnaya St., Pravdinskiy 141260, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: I-3905-2018; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>, golubev@rosinformagrotech.ru

Authors' contribution:

S. M. Gaidar – scientific management, formulation of the basic concept of the study, theoretical and experimental studies, patent analysis, conclusions, research and revision of the text; R. K. Nizamov – experimental studies, data processing; M. I. Golubev – experimental studies, literary analysis, English translation, text revision; I. G. Golubev – critical analysis, generalization of research results, review of Russian and foreign research on the topic of the article, preparation of the initial version of the text.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.