

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.45.038.72

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>



Исследование свойств продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты в качестве летучих ингибиторов коррозии при защите черных и цветных металлов

С.М. Гайдар¹, Х.Д. Куанг², В.Е. Коноплев³, А.М. Пикина^{4✉}, А.Ю. Алипичев⁵

^{1,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

² Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр; г. Хошимин, Вьетнам

^{1,4} Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); г. Москва, Россия

¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

² quanghoang1510@gmail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>

³ konoplev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

⁵ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Аннотация. Летучие ингибиторы коррозии, проникая в зазоры и адсорбируясь на поверхности, обеспечивают лучшую, чем другие виды ингибиторов, защиту металлических изделий. В частности, антикоррозионное действие аминоспиртов объясняется образованием комплексных соединений между азотом или кислородом и ионом металла. Борные эфиры образуют на поверхности металла труднорастворимые защитные пленки. Этанолламин с борной кислотой может образовывать различные продукты, но их свойства в качестве летучих ингибиторов коррозии пока не изучены. Целью исследований стали синтез продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты и исследование антикоррозионных свойств полученных веществ на черных и цветных металлах. Для определения состава и условий получения ингибитора с высокими антикоррозионными свойствами авторы провели эксперименты, в которых варьировалось соотношение реагентов и температура реакции, в результате чего разработаны методики получения летучих ингибиторов коррозии. Синтезировали 4 продукта: аддукт этаноламина и борной кислоты, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат. Антикоррозионные свойства ингибиторов изучали при ускоренных испытаниях. Оценка защитной способности определяли гравиметрическим методом, после чего рассчитали скорость коррозии, коэффициент торможения коррозии и степень защиты. Антикоррозионное действие летучих ингибиторов коррозии испытывали на образцах-пластинах из стали Ст3, меди М1 и сплавов Д16, Л63. В результате испытаний полученных ингибиторов наилучшие защитные свойства показал ди(аминоэтил)борат. Его максимальный защитный эффект (89,9%) наблюдали на стали, минимальный эффект (30,3%) – на меди. Полученные результаты позволят существенно увеличить степень защиты изделий из черных и цветных металлов от коррозии в процессе эксплуатации, транспортировки и хранения при сокращении затрат на их техническое обслуживание.

Ключевые слова: летучие ингибиторы коррозии, этаноламин, борная кислота, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат, три(аминоэтил)борат, антикоррозионные свойства ингибиторов, скорость коррозии, коэффициент торможения коррозии, степень защиты

Для цитирования: Гайдар С.М., Куанг Х.Д., Коноплев В.Е., Пикина А.М., Алипичев А.Ю. Исследование свойств продуктов взаимодействия этаноламина и борной кислоты в качестве летучих ингибиторов коррозии при защите черных и цветных металлов // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 2. С. 63-69. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>

ORIGINAL ARTICLE

Study of the properties of ethanolamine and boric acid interaction products as volatile corrosion inhibitors used to protect ferrous and non-ferrous metals**S.M. Gaidar¹, H.D. Kuang², V.E. Konoplev³, A.M. Pikina⁴, A.Yu. Alipichev⁵**^{1,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia² Russian-Vietnamese Tropical Research and Technological Center; Ho Chi Minh City, Vietnam^{1,4} Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); Moscow, Russia¹ techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>² quanghoang1510@gmail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>³ konoplev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>⁴ pikina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>⁵ alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

Abstract. Volatile corrosion inhibitors, penetrating into gaps and adsorbing on the surface, provide better protection of metal products than other types of inhibitors. In particular, the anticorrosive effect of amino alcohols is due to the formation of complex compounds between nitrogen or oxygen and the metal ion. Boron esters form hard-to-solubilize protective films on the metal surface. Ethanolamine with boric acid can form various products, but there have not been any comprehensive studies on their properties as volatile corrosion inhibitors. The aim of this study was to synthesize products of interaction between ethanolamine and boric acid and to analyze anticorrosion properties of the obtained substances on ferrous and non-ferrous metals. To determine the composition and conditions for obtaining an inhibitor with high anticorrosion properties, the authors conducted experiments with a variable ratio of reagents and reaction temperature. As a result, they developed methods for obtaining volatile corrosion inhibitors. Four products were synthesized: ethanolamine and boric acid adduct, aminoethylborate, di(aminoethyl)borate and tri(aminoethyl)borate. The anticorrosion properties of the inhibitors were checked in accelerated tests. The evaluation of the protective ability was determined by gravimetric method, after which the corrosion rate, corrosion inhibition coefficient and degree of protection were calculated. Anticorrosive effect of volatile corrosion inhibitors was tested on specimen plates made of steel St3, copper M1 and alloys D16, L63. As a result of tests of the obtained inhibitors, di(aminoethyl)borate showed the best protective properties. Its maximum protective effect of 89.9% was observed on steel, the minimum one of 30.3% – on copper. The obtained results will significantly increase the degree of protection of ferrous and non-ferrous metal products from corrosion during operation, transportation and storage while reducing the cost of their maintenance.

Keywords: volatile corrosion inhibitors, ethanolamine, boric acid, aminoethylborate, di(aminoethyl)borate, tri(aminoethyl)borate, anticorrosion properties of inhibitors, corrosion rate, corrosion inhibition coefficient, degree of protection

For citation: Gaidar S.M., Kuang H.D., Konoplev V.E., Pikina A.M., Alipichev A.Yu. Study of the properties of ethanolamine and boric acid interaction products as volatile corrosion inhibitors used to protect ferrous and non-ferrous metals. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):63-69 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-63-69>

Введение

Металлические изделия под действием различных природных, физико-химических и биологических факторов корродируют и теряют свои функциональные свойства. Выбор оптимального способа защиты металлов в зависимости от области применения изделия позволяет значительно снизить материальный ущерб, вызванный коррозией [1, 2]. Одним из наиболее распространенных методов защиты металлов от коррозии, значительно замедляющим коррозионные процессы при небольших затратах, является использование ингибиторов [3-7]. Многочисленные исследования в области защиты металлов от коррозии связаны с поиском новых и изучением уже существующих ингибирующих составов.

Наиболее перспективными и эффективными в изолированном пространстве считаются летучие ингибиторы коррозии (ЛИК). Молекулы газообразного ЛИК, проникая в зазоры, недоступные другим видам ингибиторов, адсорбируются на поверхности металла и образуют защитную пленку, замедляющую коррозионные процессы.

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

Высокую антикоррозионную активность по отношению к черным и цветным металлам показали

Контрольные образцы в эксикатор с ингибитором не помещали.

Антикоррозионные свойства ингибиторов определяли при ускоренных испытаниях. Эксперимент проводили при относительной влажности $98 \pm 2\%$, поддерживаемой введением 10%-ного раствора глицерина в соотношении к объему эксикатора 1/100. Антикоррозионные испытания включали в себя 15 последовательных циклов, каждый из которых длился 24 ч. В течение первых 10 ч каждого цикла эксикатор нагревали в течение 3 ч от комнатной температуры (25 ± 2) °С до (40 ± 2) °С и выдерживали при этой температуре в течение 7 ч. Затем эксикатор охлаждали до комнатной температуры в течение 3 ч и выдерживали при этой температуре в течение следующих 11 ч, чтобы влага из резервуара конденсировалась на испытуемом образце (рис. 2в). По окончании 15 циклов образец вынимали из эксикатора, промывали этанолом, ацетоном и сушили.

Защитную способность определяли гравиметрическим методом согласно ГОСТ Р 9.907-2007¹, после чего рассчитали скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения коррозии.

Скорость коррозии образцов-пластинок площадью поверхности $[(50,0 \times 50,0) \pm 0,2]$ мм² и толщиной 3,0...5,5 мм рассчитывали по формуле:

$$K = \Delta m / (S \cdot t),$$

где Δm – потеря массы, г; S – площадь поверхности образца, м²; t – время испытаний, сут.

Степень защиты определяли по формуле:

$$Z = (K_1 - K_i) \cdot 100 / K_1,$$



а



б



в

Рис. 2. Исследование антикоррозионных свойств:

а – размещение образцов; б – адсорбция ингибитора на образцах; в – антикоррозионные испытания

Fig. 2. Study of anticorrosion properties:

а – placement of samples; б – adsorption of inhibitor on samples; в – anticorrosion tests

а коэффициент торможения коррозии – по соотношению:

$$\gamma = K_1 / K_i,$$

где i – номер эксперимента; K_i – скорость коррозии, определенная гравиметрическим способом, г/(м²·сут.); K_1 – скорость коррозии в контрольном эксперименте в отсутствие защиты, г/(м²·сут.) [10].

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний ингибиторов коррозии на образцах из стали Ст3, алюминия Д16, меди М1 и латуни Л63 представлены в таблице.

По сравнению со всеми ингибиторами максимальными антикоррозионными свойствами обладает ди(аминоэтил)борат (табл. 1).

Наибольший защитный эффект ди(аминоэтил)бората (89,9%) наблюдается на образцах из стали Ст3, минимальный защитный эффект (30,3%) – на образце из меди (рис. 3).

Каждый опыт по определению коррозионной стойкости проводили на трех пластинках для исключения случайных ошибок. Кроме гравиметрических оценок коррозии, образцы исследовали визуально. Фотографии образцов металлов и сплавов после коррозионных испытаний в присутствии ЛИК ди(аминоэтил)бората, показавшего наилучшие результаты, и контрольных образцов (без ингибитора) представлены на рисунке 4.

Повышенные антикоррозионные свойства ди(аминоэтанол)бората по сравнению с аддуктом, аминоктанолборатом и чистым этаноламином можно объяснить наличием в молекуле первого двух аминогрупп,

¹ ГОСТ Р 9.907-2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний: введ. 1 января 2009 г.

Таблица

Результаты испытаний летучих ингибиторов коррозии на черных и цветных металлах

Table

Test results of volatile corrosion inhibitors on ferrous and non-ferrous metals

№ серии Series no.	Металл, сплав Metal, alloy	Ингибитор Inhibitor	Скорость коррозии, K, г/м ² ·сут. Corrosion rate K, g/m ² ·day	Защитный эффект, Z, % Protective effect Z, %	Коэффициент торможения коррозии, γ Corrosion inhibition coefficient, γ
1	Сталь Ст3	Аддукт этаноламина и борной кислоты	10,23	52,2	2,09
		Аминоэтилборат	4,37	79,6	4,90
		Ди(аминоэтил)борат	2,16	89,9	9,91
		Три(аминоэтил)борат	9,58	55,3	2,23
		Этаноламин	14,61	31,8	1,47
		Без ингибитора (контрольный образец)	21,41	–	–
2	Алюминий Д16	Аддукт этаноламина и борной кислоты	163,40	44,4	1,80
		Аминоэтилборат	113,20	61,5	2,60
		Ди(аминоэтил)борат	62,40	78,8	4,71
		Три(аминоэтил)борат	78,20	73,4	3,76
		Этаноламин	102,10	65,3	2,88
		Без ингибитора (контрольный образец)	294,10	–	–
3	Медь М1	Аддукт этаноламина и борной кислоты	6,56	11,0	1,12
		Аминоэтилборат	6,01	18,5	1,23
		Ди(аминоэтил)борат	5,14	30,3	1,43
		Три(аминоэтил)борат	6,42	12,9	1,15
		Этаноламин	6,93	6,0	1,06
		Без ингибитора (контрольный образец)	7,37	–	–
4	Латунь Л63	Аддукт этаноламина и борной кислоты	14,29	17,4	1,21
		Аминоэтилборат	9,34	46,0	1,85
		Ди(аминоэтил)борат	8,33	51,9	2,08
		Три(аминоэтил)борат	11,73	32,2	1,48
		Этаноламин	15,38	11,1	1,13
		Без ингибитора (контрольный образец)	17,31	–	–

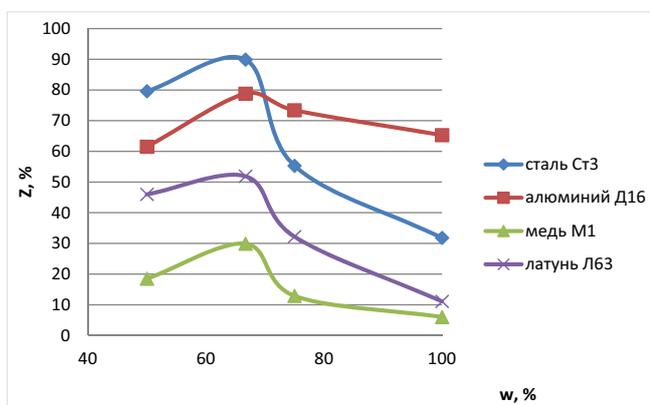


Рис. 3. Зависимость защитного эффекта летучего ингибитора коррозии Z, %, от мольной доли этаноламина w, %

Fig. 3. Relationship between the protective effect of volatile corrosion inhibitor Z (%) and the mole fraction of ethanolamine w (%)

способных образовать хелатный комплекс с ионом металла. Это позволяет молекулам ди(аминоэтанол)бората более прочно удерживаться на поверхности образца в отличие от других ингибиторов с менее устойчивыми комплексами. Молекулы три(аминоэтанол)бората имеют 3 аминогруппы, однако данный ингибитор не проявляет самых лучших антикоррозионных свойств, что обусловлено геометрией молекулы. Атом бора в своих соединениях проявляет sp²-гибридизацию, что соответствует геометрии плоского треугольника. Углы между связями В-О составляют 120°, и это стерически затрудняет участие в комплексообразовании третьей аминогруппы. Кроме того, появление в борате третьего радикала увеличивает массу молекулы и уменьшает ее летучесть, что может приводить к недостаточному насыщению поверхности металла молекулами ингибитора.

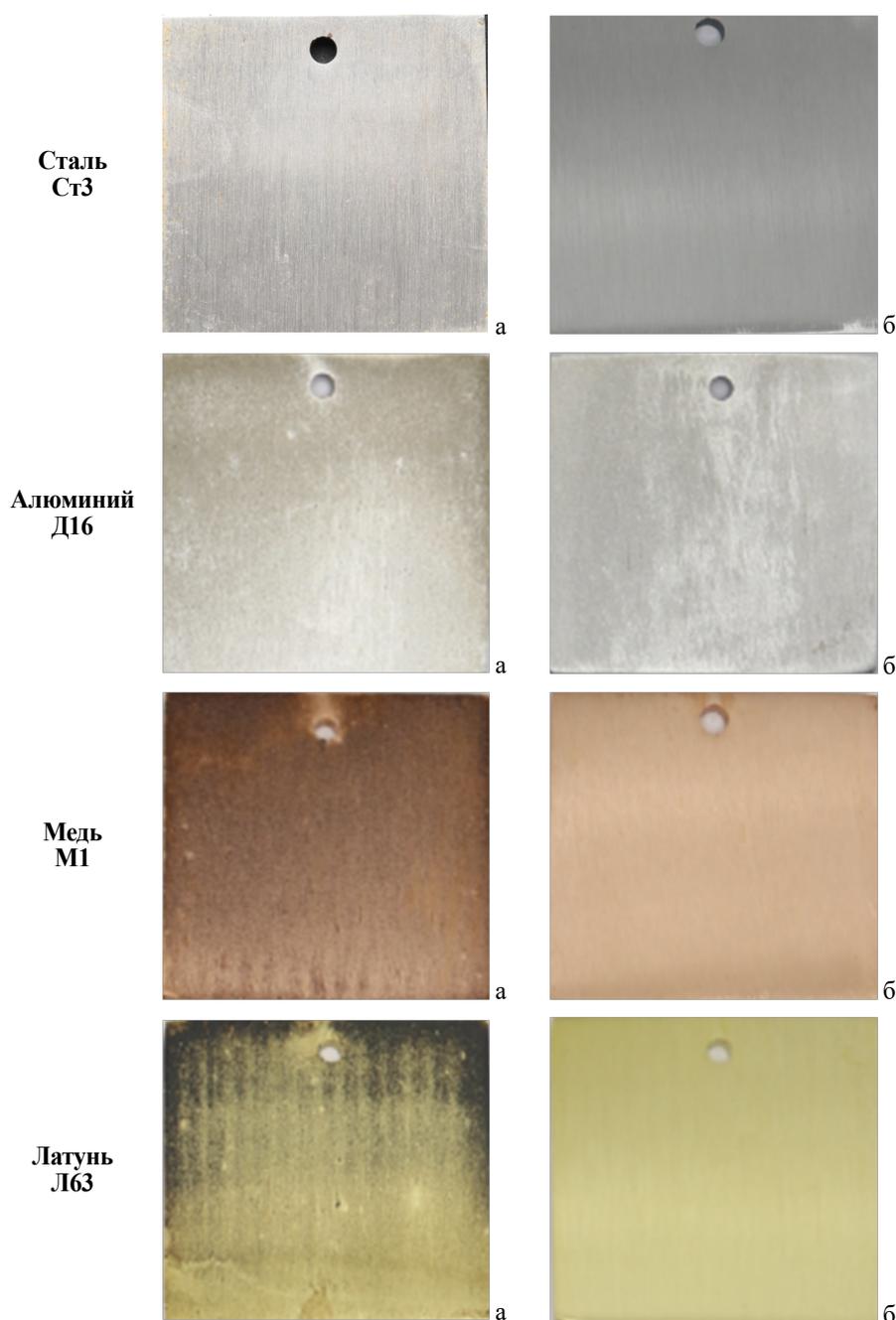


Рис. 4. Образцы после проведения коррозионных испытаний:
контрольные (а) и в присутствии ЛИК ди(аминоэтил)бората (б)

Fig. 4. Samples after corrosion tests:
control (a) and when using a volatile corrosion inhibitor – di(aminoethyl)borate (b)

Выводы

1. Полученные в результате синтеза этаноламина и борной кислоты летучие ингибиторы коррозии (аддукт, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат) и этаноламин оказывают различный защитный эффект для черных и цветных металлов.

2. Ди(аминоэтил)борат по сравнению с другими ЛИК показал наивысшую степень защиты: по отношению к стали Ст3 его защитный эффект составил 89,9%, по отношению к алюминию – 78,8%, к латуни – 51,9%, к меди – 30,3%.

Список источников / References

1. Guo Y., Rogov A., Hird A. et al. Plasma electrolytic oxidation of magnesium by sawtooth pulse current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127938>

2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y. et al. 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-Amiery 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. et al. 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. et al. Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2023;27:1847-1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>

6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K. 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. et al. 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. Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Маршаков А.И. Физико-химические аспекты ингибирования коррозии металлов // Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 3. С. 381-392. <https://doi.org/10.31857/S0044453720030152>

Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., Marshakov A.I. Physicochemical aspects of metal corrosion inhibition. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2020;94;3:505-515. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044453720030152>

9. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова Е.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 21. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

Levashova V.I., Yangirova I.V., Kazakova E.V. Review of corrosion inhibitor on the based of organoboron compounds. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2014;6:21. (In Russ.) <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408>

10. Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И. и др. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии // Коррозия: материалы, защита. 2021. № 12. С. 10-14. EDN: NCBAXN

Gaidar S.M., Konoplev V.E., Petrovsky D.I. Investigation of synergistic effect of contact inhibitors of anodic and cathodic action in protection of steel against corrosion. *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2021;12:10-14. (In Russ.) EDN: NCBAXN

Информация об авторах

¹ Гайдар Сергей Михайлович, д-р техн. наук, профессор; techmash@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus AuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

² Хоанг Дык Куанг, канд. хим. наук; quanghoang1510@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: 57201699580

³ Коноплев Виталий Евгеньевич, канд. хим. наук, доцент; konoplev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

⁴ Пикина Анна Михайловна, канд. техн. наук, доцент; pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

⁵ Алипичев Алексей Юрьевич, канд. пед. наук, доцент; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

^{1,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

² Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр; 727010, Вьетнам, г. Хошимин, район 10, ул. 3/2³

^{1,4} Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); 119071, Российская Федерация, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Вклад авторов

С.М. Гайдар – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулирование общих выводов; Д.К. Хоанг – проведение эксперимента, обработка результатов исследований;

Коноплев В.Е. – научное руководство, формулирование основных направлений исследований, формулирование общих выводов;

А.М. Пикина – литературный анализ, обработка результатов исследований, подготовка рукописи;

Алипичев А.Ю. – англоязычный перевод.

Статья поступила 31.10.2024, после рецензирования и доработки 04.03.2025; принята к публикации 07.03.2025

Author Information

Sergey M. Gaidar¹, DSc (Eng), Professor; techmash@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus AuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

Hoang Duc Quang², PhD (Chem); quanghoang1510@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: 57201699580

Vitaly E. Konoplev³, CSc (Chem), Associate Professor; konoplev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1835-1805>

Anna M. Pikina⁴, CSc (Eng), Associate Professor; pikina@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7116-3526>

Aleksey Yu. Alipichev⁵, CSc (Ed), Associate Professor; alipichev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8000-4532>

^{1,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russia, Moscow, 49, Timiryazevskaya Str.

² Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center; 727010, Vietnam, Ho Chi Minh City, District 10^{3/2} St., 3

^{1,4} Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art); 1, Malaya Kaluzhskaya Str., Moscow, 119071, Russia

Author Contribution

S.M. Gaidar – research supervision, conceptualization, conclusions; D.K. Hoang – investigation, formal analysis, validation; V.E. Konoplev – research supervision, conceptualization, conclusions;

A.M. Pikina – literature review, data curation, formal analysis, writing – original draft;

A.Yu. Alipichev – writing – English translation and editing.

Received 31.10.2024; Revised 04.03.2025; Accepted 07.03.2025