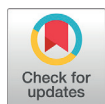


МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>EDN: <https://elibrary.ru/axdrtw>

УДК / UDK 631.3.02

Оригинальная статья / Original article

**Тетраборфосфатные ингибиторы для защиты
рабочих органов сельскохозяйственных машин
от коррозии в процессе межсезонного хранения****И. В. Фадеев¹✉, И. А. Успенский², М. Н. Чаткин³,
И. А. Юхин², С. Р. Петров⁴, А. С. Казарин⁵**¹ Чувашский государственный педагогический
университет имени И. Я. Яковлева,г. Чебоксары, Российская Федерация, <https://ror.org/00x9nm172>² Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П. А. Костычева,г. Рязань, Российская Федерация, <https://ror.org/05q4zgq93>³ Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>⁴ Чувашский государственный аграрный университет,

г. Чебоксары, Российская Федерация

⁵ Независимый исследователь,

г. Рязань, Российская Федерация

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru*Аннотация*

Введение. Проблема коррозионного разрушения рабочих органов сельскохозяйственных машин в период межсезонного хранения остается актуальной из-за неэффективности традиционных методов консервации. Решение этой проблемы необходимо для снижения материальных потерь, увеличения срока службы техники и обеспечения бесперебойности сезонных полевых работ.

Цель исследования. Теоретическое и экспериментальное обоснование применения тетраборфосфатов щелочных металлов и аммония в качестве высокоэффективных ингибиторов коррозии для защиты стали 65Г.

Материалы и методы. Объектом исследования является сталь 65Г, из которой изготавливают рабочие органы сельскохозяйственных машин. Ингибирующее действие синтезированных тетраборфосфатов лития, натрия, калия и аммония оценивали гравиметрическим (по ГОСТ 9.908–85, весы ВЛА-200 г-М), электрохимическим (потенциостат П-5848, трехэлектродная ячейка) и коррозионно-усталостным (база испытаний 2 · 10⁶ циклов) методами в 3 %-м растворе NaCl.

© Фадеев И. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А., Петров С. Р., Казарин А. С., 2026

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

Результаты исследования. При добавлении тетраборфосфата калия в 3 %-й раствор NaCl скорость коррозии стали 65Г составила $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч), тогда как в растворе без ингибитора – $44,6 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·ч). По данным электрохимических измерений потенциал коррозии стали в присутствии тетраборфосфата калия сместился с –0,42 до –0,16 В. В моющем растворе МС-8 с добавкой тетраборфосфата калия (5 кг/м³) при температуре 60 °С и продолжительности мойки 6 минут степень очистки поверхности достигла 88,9 %, краевой угол смачивания составил 25°. При коррозионно-усталостных испытаниях на базе $2 \cdot 10^6$ циклов предел выносливости стали в агрессивной среде с добавкой тетраборфосфата калия повысился на 6,5 МПа по сравнению с раствором без ингибитора.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют рекомендовать изученные тетраборфосфатные соединения, особенно тетраборфосфата калия, в качестве эффективных моюще-пассивирующих добавок к водным моющим растворам и составам для защиты от коррозии рабочих органов сельскохозяйственной техники в период межсезонного хранения. Это позволит обеспечить технологичность, экологичность и повышение долговечности техники.

Ключевые слова: ингибиторы коррозии, тетраборфосфаты, сталь 65Г, межсезонное хранение, синтетические моющие средства, коррозионная стойкость, краевой угол смачивания, коррозионная усталость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фадеев И.В., Успенский И.А., Чаткин М.Н., Юхин И.А., Петров С.Р., Казарин А.С. Тетраборфосфатные ингибиторы для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин от коррозии в процессе межсезонного хранения. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):416–432. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>

Tetraborophosphate Inhibitors for Protecting Agricultural Machinery Components Against Corrosion during Off-Season Storage

I. V. Fadeev^a✉, I. A. Uspensky^b, M. N. Chatkin^c,

I. A. Yukhin^b, S. R. Petrov^d, A. S. Kazarin^e

^a Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University, Cheboksary, Russian Federation, <https://ror.org/00x9nm172>

^b Ryazan State Agrotechnological University

named after P. A. Kostychev,

Ryazan, Russian Federation, <https://ror.org/05q4zgg93>

^c National Research Mordovia State University,

Saransk, Russian Federation, <https://ror.org/0262qgk29>

^d Chuvash State Agrarian University,

Cheboksary, Russian Federation

^e Independent Researcher,

Ryazan, Russian Federation

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru

Abstract

Introduction. The problem of corrosion damage to the working bodies of agricultural machinery during off-season storage remains a pressing one due to the ineffectiveness of traditional preservation methods. Solving this problem is necessary to reduce material losses, increase the service lifetime of equipment, and ensure uninterrupted operation during seasonal fieldwork.

Aim of the Study. The study is aimed at the theoretical and experimental substantiation for the use of alkali metal and ammonium tetraboron phosphates as highly effective corrosion inhibitors for protecting steel 65G.

Materials and Methods. The object of the study was steel 65G, which is used to manufacture the working bodies of agricultural machines. The inhibitory effect of the synthesized lithium, sodium, potassium, and ammonium tetraborophosphates was assessed using the gravimetric (according to GOST 9.908–85, VLA-200 g-M scales), electrochemical (potentiostat P-5848, three-electrode cell), and corrosion fatigue ($2 \cdot 10^6$ cycles) methods in a 3% NaCl solution.

Results. When potassium tetraborophosphate was added to a 3% NaCl solution, the corrosion rate of steel 65G was $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, while it was $44.6 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in a solution without an inhibitor. According to electrochemical measurement data, the steel corrosion potential in the solution with potassium tetraborophosphate changed from -0.42 to -0.16 V. In the cleaning solution MS-8 with the addition of potassium tetraborophosphate ($5 \text{ kg}/\text{m}^3$) at a temperature of 60°C and a washing period of 6 minutes, the surface cleaning degree reached 88.9%, and the contact angle was 25° . In carrying out corrosion fatigue tests based on $2 \cdot 10^6$ cycles, the steel fatigue limit in an aggressive environment with potassium tetraborophosphate increased by 6.5 MPa compared to a solution without an inhibitor.

Discussions and Conclusion. The results obtained allow us to recommend the studied tetraboron phosphate compounds, particularly potassium tetraboron phosphate, as effective detergent-passivating additives to aqueous cleaning solutions and to corrosion protection compounds for agricultural machinery during off-season storage. This will ensure technological effectiveness, environmental friendliness, and increased lifetime of the equipment.

Keywords: corrosion inhibitors, tetraborophosphates, 65G steel, off-season storage, synthetic detergents, corrosion resistance, contact angle, corrosion fatigue

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

For citation: Fadeev I.V., Uspensky I.A., Chatkin M.N., Yukhin I.A., Petrov S.R., Kazarin A.S. Tetraborophosphate Inhibitors for Protecting Agricultural Machinery Components Against Corrosion during Off-Season Storage. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):416–432. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.416-432>

ВВЕДЕНИЕ

Агропромышленный комплекс является стратегически важной отраслью экономики Российской Федерации, обеспечивающей продовольственную безопасность государства. Эффективность его функционирования в значительной степени определяется технической оснащённостью и сохранностью парка сельскохозяйственных машин (СХМ) [1]. Особую роль в этом играет состояние наиболее уязвимых элементов – рабочих органов, к которым относятся лемеха плугов, лапы культиваторов, диски борон, сегменты косилок и другие детали, непосредственно контактирующие с абразивными и агрессивными средами [2]. Значительные разрушительные процессы происходят в периоды межсезонного хранения, когда техника подвергается интенсивному воздействию атмосферных осадков, конденсата, почвенных электролитов, оставшихся на поверхностях, и перепадов температур [3]. Именно в эти периоды развивается интенсивная атмосферная коррозия, понижается усталостная прочность металла, и все это приводит к преждевременному выходу деталей из строя в последующий период эксплуатации.

Традиционные способы консервации техники на период хранения (смазки, густые нефтяные составы, лакокрасочные покрытия) зачастую являются трудоёмкими, требуют специального оборудования для нанесения и, что критически

важно, последующего удаления перед началом работ. Многие из них недостаточно эффективны в условиях длительного воздействия агрессивных сред, адсорбируют влагу, склонны к стеканию и растрескиванию [1; 2]. Кроме того, процесс их удаления сопряжен с использованием органических растворителей, щелочных растворов и механических методов, что увеличивает трудоемкость подготовки техники к эксплуатационному сезону и негативно влияет на экологическую обстановку [4].

В связи с вышеизложенным, создание новых, высокоэффективных и технологичных способов защиты рабочих органов СХМ для условий межсезонного хранения представляет собой актуальную научно-практическую проблему. Наиболее перспективным направлением является разработка и внедрение ингибиторов коррозии, которые могут быть интегрированы в процессы обслуживания и консервации машин. Такие составы должны обладать комплексом свойств: высокой защитной эффективностью; способностью к адгезии и адсорбции на металлических поверхностях; хорошей проникающей способностью в зазоры и щели; простотой нанесения (методом распыления, окунания); легкостью удаления (например, водосмываемость) или, альтернативно, не требовать удаления перед эксплуатацией, выполняя функцию смазочного материала на начальном этапе эксплуатационного сезона.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование применения новых тетраборфосфатных соединений (ТБФС) щелочных металлов и аммония в качестве высокоэффективных ингибиторов коррозии для защиты рабочих органов СХМ в процессе межсезонного хранения.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать информацию по теме исследования и выбрать пути реализации; синтезировать и охарактеризовать тетраборфосфаты лития (ТБФЛ), натрия (ТБФН), калия (ТБФК) и аммония (ТБФА); оценить эффективность ингибирующего действия синтезированных тетраборфосфатов на коррозию стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl гравиметрическим, электрохимическим и коррозионно-усталостным испытанием; изучить влияние присутствия ТБФС в водных растворах синтетических моющих средств (СМС) на степень очистки и краевого угол смачивания металлической поверхности при различной продолжительности мойки и температуре растворов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема защиты рабочих органов сельскохозяйственной техники от коррозии в условиях межсезонного хранения остается актуальной как в российской, так и в мировой научной среде. Традиционные методы консервации, такие как использование нефтяных смазок, лакокрасочных покрытий и восковых составов, обладают рядом существенных недостатков: трудоемкость нанесения и удаления, низкая экологичность, недостаточная долговечность и склонность к механическим повреждениям [1–4]. В связи с этим в последние десятилетия большое внимание уделяется разработке ингибиторов коррозии, интегрируемых в моющие и консервационные составы, что позволяет совмещать процессы очистки и защиты металлических поверхностей.

В отечественных исследованиях активно развиваются подходы к созданию комплексных ингибиторов на основе боратов и фосфатов. Так, ученые из Чувашии

показали высокую эффективность фосфатборатных соединений в нейтральных водных средах, подчеркнув их способность формировать на поверхности стали устойчивые пассивные пленки [5; 6]. Аналогичные результаты были получены при использовании дипинаконборатных [4; 7] и амидоборатных [8] соединений, которые демонстрируют выраженный анодный характер ингибирования и совместимость с СМС. Была обоснована целесообразность применения ингибиторов в составе моющих растворов для СХМ и акцентировано внимание на таких параметрах, как краевой угол смачивания, адгезия и водосмываемость [2; 9].

Зарубежные исследователи также уделяют значительное внимание разработке «зеленых» ингибиторов коррозии, в частности, на основе фосфатов и боратов. В этом направлении успешно работает коллектив ученых из Норвегии [10], который посвятил свои исследования современным фосфатсодержащим ингибиторам и подтвердил их высокую эффективность в нейтральных и слабощелочных средах, а также способность взаимодействовать с ионами железа с образованием защитных комплексов. С. Verma, Е. Е. Ebenso и М. А. Quraishi рассмотрели боратсодержащие ингибиторы и отметили их низкую токсичность, биоразлагаемость и совместимость с другими компонентами моющих составов, что делает их перспективными для промышленного применения [11]. При этом зарубежные авторы больше внимания уделяют органическим или гибридным (органико-неорганическим) ингибиторам, тогда как российские исследователи отдают предпочтение неорганическим солевым комплексам, в частности, тетраборфосфатам щелочных металлов и аммония [12–14].

Однако ряд вопросов в этой области все еще остается нерешенным. Во-первых, недостаточно изучено влияние таких соединений на коррозионно-усталостную прочность сталей, особенно в условиях циклических нагрузок, характерных для эксплуатации рабочих органов почвообрабатывающих и других СХМ [1; 3]. Во-вторых, отсутствуют системные данные о совместимости ингибиторов с различными типами СМС и их поведении при изменении температуры и pH [15; 16]. В-третьих, редко рассматривается применение ингибиторов именно в контексте межсезонного хранения СХМ, чаще речь идет о защите в промышленных системах охлаждения, нефтегазовой отрасли или транспорте [17–19].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области разработки ингибиторов коррозии, актуальной остается задача создания моюще-пассивирующих составов, сочетающих высокую очищающую способность, низкий краевой угол смачивания, выраженный анодный характер ингибирования и положительное влияние на усталостную прочность металла. Именно на решение этой комплексной задачи направлено исследование тетраборфосфатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез и характеристика тетраборфосфатных соединений

В экспериментах использовали ТБФЛ брутто-формулы $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ТБФН брутто-формулы $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ТБФК брутто-формулы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и ТБФА брутто-формулы $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Образование вышеперечисленных соединений установлено изучением боратных

водно-солевых систем методами физико-химического анализа [5; 14]. Тетраборфосфаты синтезировали по реакции совместной кристаллизации из водных растворов тетраборатов и фосфатов в стехиометрических соотношениях в 4 реакционных колбах (№1–4) емкостью по 0,002 м³, в которые наливали по 0,0012 м³ дистиллированной воды и вносили: в колбу №1 – 232 г (2 моля) фосфата лития и 170 г (1 моль) тетрабората лития, в колбу №2 – 328 г (2 моля) фосфата натрия и 170 г (1 моль) тетрабората натрия, в колбу №3 – 212 г (1 моль) фосфата калия и 234 г (1 моль) тетрабората калия, в колбу №4 – 149 г (1 моль) фосфата аммония и 192 г (1 моль) тетрабората аммония. Смеси непрерывно перемешивали в течение 6 часов при температуре 25 °С [5]. Приготовленные растворы переносили в кристаллизаторы для выращивания кристаллов.

Синтезированное соединение ТБФЛ (колба №1) представляет мелкокристаллическое вещество с выходом продукта 91–93 %, хорошо растворяется в воде. Для соединения $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ пикнометрическим методом определена плотность в бензоле и толуоле, которая равна в среднем 1,684 кг/м³; его молекулярный объем равен $281,47 \times 10^{-6}$ м³/моль, удельный объем – $5,94 \times 10^{-4}$ м³/кг. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,584 (наибольший показатель преломления); N_p – 1,456, (наименьший).

Соединение ТБФН (колба №2) представляет собой белый порошок, с выходом продукта 92–95 %, хорошо растворяется в воде. Для соединения $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ пикнометрическим методом определена плотность в бензоле и толуоле, равная в среднем 1,706 кг/м³; его молекулярный объем равен $352,87 \times 10^{-6}$ м³/моль, удельный объем – $5,86 \times 10^{-4}$ м³/кг. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,592; N_p – 1,451.

Соединение ТБФК (колба №3) кристаллизуется в виде гексагональных призм с выходом продукта 93–95 %, хорошо растворяется в воде. Для полученного соединения брутто-формулы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ определена плотность, которая равна 1,535 кг/м³, а вычисленные молекулярный и удельный объемы соответственно равны $314,01 \times 10^{-6}$ м³/моль и $6,52 \times 10^{-4}$ м³/кг. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,552; N_p – 1,475.

Соединение ТБФА брутто-формулы $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (колба №4) кристаллизуется в виде тонких прозрачных игл с выходом продукта 92–94 %, хорошо растворяется в воде. Его плотность – 1,460 кг/м³; молекулярный объем равен $282,88 \times 10^{-6}$ м³/моль, удельный объем – $6,85 \times 10^{-4}$ м³/кг. Показатели преломления кристаллов: N_g – 1,607; N_p – 1,483.

Методика электрохимических испытаний

Исследования влияния ТБФС на противокоррозионную устойчивость высокоуглеродистой стали 65Г, которая широко используется в конструкциях рабочих органов почвообрабатывающих машин [3], периодически подвергаемых консервации при межсезонном и зимнем хранении, проводили следующим образом. Сначала определили оптимальную концентрацию ТБФС в коррозионно-активной среде (3 %-й водный раствор NaCl) по максимальному смещению потенциала активации стали 65Г в потенциостатическом режиме поляризации. Данная информация была получена путем измерения стационарных потенциалов высокоомным вольтметром потенциостата П-5848.

Эксперимент был проведен в соответствии с разработанной методикой электрохимических испытаний [18; 19].

Методика гравиметрических испытаний и коррозионно-усталостных испытаний

Гравиметрические исследования скорости коррозии стали проводили на основании описанной методики [2; 5]. Образцы из стали 65Г погружали в 3 %-е водные растворы хлорида натрия без ингибиторов и ингибированных ТБФС. После этого они выдерживались в течение 10 часов при температуре 70–80 °С, извлекались из раствора и оставлялись в воздухе на 24 часа. Это составляло один цикл испытаний. Испытания проводились в течение 5 циклов (120 часов). После каждого цикла 3 опытных образца обрабатывали, взвешивали на аналитических весах ВЛА-200 г-М с точностью до 0,0005 г с последующей обработкой результатов по ГОСТ 9.908–851 ($n = 5$, доверительная вероятность 95 %) и вычисляли скорость коррозии [17; 19].

Коррозионно-усталостные испытания проводили на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов [18].

Методика изучения влияния тетраборфосфатных соединений на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности

Современные антикоррозионные и консервационные составы для СХМ должны иметь надежную адгезию. Одним из ключевых факторов, определяющих величину адгезии, особенно на молекулярном уровне, является смачиваемость. Мерой смачивания поверхности является краевой угол смачивания, который образуется между поверхностями жидкого и твердого веществ в точке соприкосновения фаз [9]. В связи с этим изучено влияние присутствия ТБФС в количестве 5 кг/м³ в 3 %-х водных растворах СМС МС-8 на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности при различной продолжительности мойки и температуре растворов. Краевой угол смачивания раствора определяли на кварцевой пластине. Каплю связующего раствора размером 1–2 мм формировали с помощью кварцевого капилляра. Измерения контактного угла с точностью $\pm 1^\circ$ проводили катетометром КМ-6 с угломерной головкой [9]. Опыты по влиянию ТБФС на краевой угол смачивания и степень очистки металлической поверхности проводили по известной и широко применяемой в научных экспериментах методике [17]. Для каждой точки эксперимента опыты проводились с трехкратной повторностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

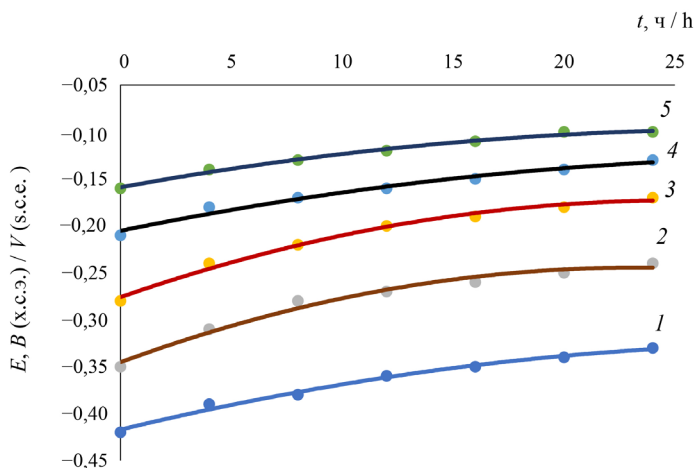
Исследования влияния тетраборфосфатных соединений на противокоррозионную устойчивость стали 65Г

Электрохимические исследования показали, что без внешней поляризации стационарный потенциал стали в 3 %-м растворе хлорида натрия со временем снижается и через 30 минут принимает значения $-0,42$ В. Добавление тетраборфосфатов в коррозионно-активную среду способствует повышению потенциала стали, и при концентрации 0,5 % в расчете на безводную соль их значения равны: в 3 %-м растворе NaCl + ТБФЛ – ($-0,35$ В); в 3 %-м растворе NaCl + ТБФА – ($-0,28$ В);

¹ ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383> (дата обращения: 03.06.2025).

в 3 %-м растворе NaCl + ТБФН – (–0,21 В); в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК – (–0,16 В). Увеличение концентрации ТБФС свыше 0,5 % не приводит к существенному изменению стационарного потенциала стального образца. По этой причине дальнейшие эксперименты по изучению скорости коррозии стали 65Г в испытуемых растворах проводились при 0,5 %-й массовой концентрации ТБФС.

Введение ТБФС в 3 %-й раствор NaCl приводит к заметному повышению коррозионной стойкости стали. Установлено, что электродные потенциалы стали 65Г через 24 часа приобретают значения более положительные в ингибированных растворах, по сравнению с чистым 3 %-м водным раствором хлорида натрия (рис. 1), а по пассивирующему действию ТБФС располагаются в следующей последовательности: ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ.



Р и с. 1. Изменение во времени стационарного потенциала стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl:

1 – в чистом растворе; 2 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФЛ; 3 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФА; 4 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФН; 5 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФК

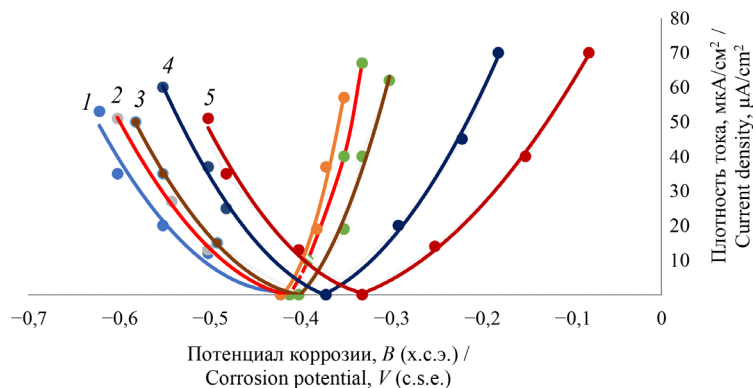
F i g. 1. Changes in time of the steady state potential of steel 65G in a 3% NaCl aqueous solution:

1 – in clear solution; 2 – with the addition of 5 kg/m³ lithium tetraborophosphate; 3 – with the addition of 5 kg/m³ ammonium tetraborophosphate; 4 – with the addition of 5 kg/m³ sodium tetraborophosphate; 5 – with the addition of 5 kg/m³ potassium tetraborophosphate

Источники: рисунки 1–3 составлены авторами статьи в Microsoft Excel.

Source: the figures 1–3 were made by the authors of the article Microsoft Excel.

В ходе эксперимента потенциостатическим методом получены поляризационные кривые в испытуемых растворах при прямом и обратном ходе замеров, которые представлены в координатах « $E - i$ » (потенциал – плотность тока) (рис. 2). В присутствии ТБФС в 3 %-м растворе NaCl (кривые 2–5) потенциалы коррозии металла смещены в положительную сторону относительно потенциала коррозии $E_{кор.}$ в фоновом электролите (кривая 1). При этом ТБФК характеризуется большей ингибирующей способностью, чем ТБФН, ТБФА и ТБФЛ.



Р и с. 2. Анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали 65Г в 3 %-м водном растворе NaCl:

1 – в чистом растворе; 2 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФЛ; 3 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФА; 4 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФН; 5 – с добавлением 5 кг/м³ ТБФК

F i g. 2. Anodic and cathodic potentiodynamic polarization curves of 65G steel in 3% aqueous NaCl solution:

1 – in clear solution; 2 – with the addition of 5 kg/m³ lithium tetraborophosphate; 3 – with the addition of 5 kg/m³ ammonium tetraborophosphate; 4 – with the addition of 5 kg/m³ sodium tetraborophosphate; 5 – with the addition of 5 kg/m³ potassium tetraborophosphate

Исследования влияния тетраборфосфатных соединений на скорость коррозии стали 65Г

Скорость коррозии стали после 24 и 120 часов испытания в 3 %-м водном растворе NaCl составила $44,6 \cdot 10^{-3}$ и $32,8 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч, соответственно. ТБФС понижают скорость коррозии стали в 3 %-м водном растворе хлорида натрия. Скорость коррозии через 24 ч испытания в присутствии ТБФЛ равна $30,4 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; через 120 ч – $25,6 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч. В присутствии ТБФН – $14,6 \cdot 10^{-3}$ и $7,8 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; в присутствии ТБФК – $9,2 \cdot 10^{-3}$ и $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч; в присутствии ТБФА – $20,2 \cdot 10^{-3}$ и $13,7 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч.

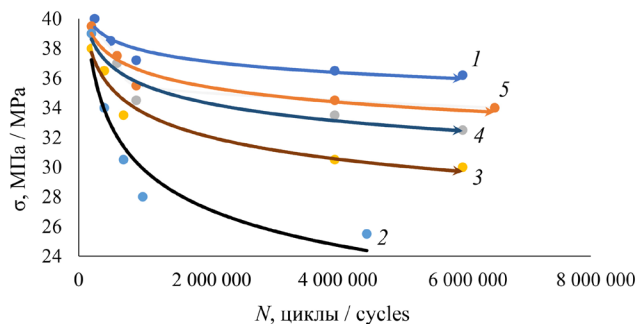
Значения pH растворов в исследуемых средах измерены.

Исследование влияния тетраборфосфатных соединений на коррозионно-усталостную прочность стали 65Г

Уменьшение циклической прочности стали вызывается разрушениями, связанными с чисто коррозионными и коррозионно-механическими поражениями. Наличие ингибитора в коррозионной среде может оказывать влияние на оба разрушающих фактора, вызывающих снижение прочности металла. На рисунке 3 представлены результаты усталостных и коррозионно-усталостных исследований стали в воздухе и растворах МС-8, проведенных по разработанной методике [15; 18].

Приведенные данные указывают на то, что суммарная потеря циклической прочности стали 65Г в 3 %-м растворе NaCl на базе испытания $N = 2\,000\,000$ циклов составляет 9,9 МПа (кривые 1 и 2). Из них 6,6 МПа приходится на чисто коррозионные поражения и 3,3 МПа на коррозионно-механические (кривые 1, 2 и 3). Добавка ТБФК в 3 %-й раствор NaCl увеличивает циклическую прочность стали (сравнение кривых 2 и 3). Данный эффект обусловлен снижением действия разрушающих факторов на уменьшение циклической прочности металла (кривые 1, 3 и 5). На данной

базе испытания ТБФК в большей мере уменьшает разрушающее действие коррозионных поражений и в меньшей – коррозионно-механических.



Р и с. 3. Кривые усталости и коррозионной усталости стали 65Г:

- 1 – в воздухе; 2 – в 3 %-м растворе NaCl; 3 – в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК 5 кг/м³;
4 – в воздухе после предварительной выдержки в 3 %-м растворе NaCl;
5 – в воздухе после предварительной выдержки в 3 %-м растворе NaCl + ТБФК 5 кг/м³;

F i g. 3. Fatigue and corrosion fatigue curves for steel 65G:

- 1 – in air; 2 – in a 3 % NaCl solution; 3 – in a 3 % NaCl + PTBP solution 5 kg/ m³;
4 – in air after preliminary exposure to a 3 % NaCl solution;
5 – in air after preliminary exposure to a 3 % NaCl + PTBP solution 5 kg/ m³

Проведенные электрохимические и гравиметрические измерения позволили количественно сопоставить защитную эффективность всех четырех синтезированных тетраборфосфатных соединений. Для каждого из них были зафиксированы значения стационарного потенциала и скорости коррозии стали 65Г в 3 %-м растворе хлорида натрия. Полученные данные свидетельствуют о том, что введение тетраборфосфатов изменяет кинетику электродных процессов на поверхности металла. Наибольшее смещение потенциала в положительную сторону и минимальная скорость коррозии зафиксированы в присутствии тетраборфосфата калия. Этот результат рассматривается как наиболее значимый для последующей разработки технологических составов.

Однако эффективность консервации определяется не только способностью ингибитора тормозить коррозию, но и его совместимостью с моющими средствами. Поверхность рабочих органов сельскохозяйственных машин перед закладкой на хранение требует обязательной очистки от загрязнений. В связи с этим были проведены дополнительные эксперименты по оценке моющей способности 3 %-х водных растворов синтетического моющего средства МС 8, содержащих добавки тетраборфосфатов. В ходе испытаний варьировали температуру раствора от 20 до 80 °С и продолжительность мойки от 2 до 8 минут. Для каждого режима определяли степень очистки стальных образцов и краевой угол смачивания. Именно эти параметры характеризуют способность раствора удалять загрязнения и равномерно смачивать поверхность, что критически важно для формирования защитной пленки.

В таблице представлены экспериментальные данные исследования влияния присутствия ТБФС в количестве 5 кг/м³ в 3 %-х водных растворах СМС МС-8 на степень очистки и краевой угол смачивания поверхности образцов при различной продолжительности мойки и температуре растворов.

Таблица
Table

Влияние ТБФС в количестве 5 кг/м³ на степень очистки и краевой угол смачивания при различных значениях продолжительности мойки и температуры 3 %-х водных растворов МС-8
The effect of tetraborophosphate compounds at 5 kg/m³ on the cleaning efficiency and contact angle of 3% aqueous solutions of MS-8 at different washing periods and temperatures

Температура раствора, °C / Solution temperature, °C	Продолжительность мойки, мин. / Washing period, min.	3 %-й водный раствор МС-8 (контроль) / 3% aqueous solution of MS-8 (control)		ТБФЛ / Lithium tetraborophosphate		ТБФН / Sodium tetraborophosphate		ТБФК / Potassium tetraborophosphate		ТБФА / Ammonium tetraborophosphate	
		Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания Θ, ° / Contact angle Θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания Θ, ° / Contact angle Θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания Θ, ° / Contact angle Θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания Θ, ° / Contact angle Θ, °	Степень очистки, % / Degree of purification, %	Краевой угол смачивания Θ, ° / Contact angle Θ, °
20	2	29,3	56	38,2	51	48,4	43	51,8	40	36,2	54
	4	35,4	52	46,1	48	54,8	42	62,5	38	40,1	51
	6	48,3	49	55,8	42	63,9	40	68,9	36	45,8	48
	8	51,1	46	56,1	40	64,8	38	71,6	35	50,1	46
40	2	32,5	54	41,2	47	58,3	40	61,8	37	38,2	50
	4	40,6	51	52,5	43	64,8	37	67,5	34	46,1	49
	6	54,2	46	66,8	39	73,9	34	78,9	31	55,8	45
	8	62,4	41	68,1	38	75,8	32	79,6	29	60,4	43
60	2	44,7	50	50,2	44	68,3	38	74,8	34	41,2	49
	4	51,2	46	58,5	40	74,8	35	79,5	30	50,1	45
	6	63,8	40	74,8	36	79,9	32	88,9	25	63,8	40
	8	71,3	32	76,1	34	81,8	30	89,6	24	65,4	39
80	2	38,8	51	45,2	49	59,3	42	60,8	39	37,2	49
	4	44,3	49	50,5	45	63,8	40	64,5	35	43,1	47
	6	54,2	47	61,8	41	71,9	36	71,9	32	51,8	45
	8	53,0	48	61,1	39	70,8	35	70,6	32	50,4	46

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что тетраборфосфатные соединения, особенно ТБФК, эффективно снижают скорость коррозии стали 65Г в нейтральных хлоридсодержащих средах. Снижение скорости коррозии с $44,6 \cdot 10^{-3}$ до $4,2 \cdot 10^{-3}$ г/м²·ч и смещение стационарного потенциала в положительную сторону (с $-0,42$ до $-0,16$ В) свидетельствуют о преимущественно анодном механизме ингибирования, что согласуется с ранее опубликованными данными [5; 6] для фосфатборатных соединений.

Сопоставление с результатами других исследований [10; 11] показывает, что неорганические боратфосфатные комплексы не уступают по эффективности некоторым «зеленым» органическим ингибиторам, а по технологичности и стабильности в моющих растворах превосходят их. Выявленная последовательность пассивирующего действия (ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ) коррелирует с буферной емкостью и способностью формировать плотные феррогидроксотетраборфосфатные пленки на поверхности металла.

Из данных исследования влияния ТБФС на скорость коррозии стали 65Г следует, что ТБФК в большей степени тормозит скорость коррозии.

Измерение значений pH растворов показало, что бораты натрия обладают буферным действием, и при разбавлении концентрация водородных ионов остается практически неизменной. Наибольшую ингибирующую способность ТБФК можно объяснить более сильным подщелачиванием раствора и его наибольшей буферной емкостью, которая позволяет регулировать, а также поддерживать необходимое значение pH раствора. Ингибирующий эффект ТБФК, по-видимому, связан не только с увеличением концентрации гидроксид-ионов, но и с образованием на поверхности металла более плотной пассивной феррогидроксотетраборфосфатной пленки. Вероятнее всего полярные молекулы ТБФС адсорбируются на поверхности корродирующего металла электростатически за счет кулоновских сил.

Результаты коррозионно-усталостных испытаний позволяют утверждать, что ТБФС повышают циклическую прочность стали, снижая действие разрушающих факторов и таким образом увеличивают коэффициент запаса циклической прочности углеродистой стали в агрессивных водных растворах. Такое действие ТБФС можно объяснить его влиянием на кинетику электродных процессов специфических пар Эванса, с работой которых связаны чисто коррозионные и коррозионно-механические разрушения [15; 18].

Из данных таблицы видно, что 3 %-е водные растворы синтетического моющего средства МС-8 с добавкой тетраборфосфатных соединений в количестве 5 кг/м³ обладают высокой степенью очистки и небольшим значением краевого угла смачивания металлической поверхности, что соответствует требованиям практического применения антикоррозионных и консервационных составов. При этом значения степени очистки увеличиваются с повышением температуры раствора от 20 до 80 °С. В интервале температур раствора от 60 до 80 °С происходит уменьшение моющих свойств тетраборфосфатных растворов. Данное явление можно объяснить выделением в раствор молекул коллоидных частиц, что

в итоге приводит к уменьшению концентрации компонентов раствора и ухудшению моющего свойства. Наибольшим моющим эффектом обладает 3 %-й водный раствор МС-8 в присутствии ТБФК в количестве 5 кг/м³ при температуре 60 °С и продолжительности мойки 6 минут.

Ограничением исследования является проведение экспериментов только на одной марке стали (65Г) и в одной коррозионной среде (3 % NaCl), что не полностью охватывает многообразие условий межсезонного хранения СХМ. Сильной стороной работы является комплексное применение гравиметрических, электрохимических и коррозионно-усталостных методов, а также изучение моющих свойств и смачиваемости, что позволило оценить пригодность ТБФС для совмещенных процессов очистки и пассивации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированные тетраборфосфаты лития, натрия, калия и аммония эффективно снижают скорость коррозии стали 65Г в 3 %-м растворе NaCl, а по пассивирующему действию располагаются в последовательности: ТБФК > ТБФН > ТБФА > ТБФЛ. Наибольшую эффективность показал тетраборфосфат калия, обеспечивающий снижение скорости коррозии в 10,6 раза.

Новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности совместного использования ТБФС в моющих растворах синтетического моющего средства МС-8, где они одновременно улучшают очистку (до 88,9 %) и снижают краевой угол смачивания (до 25°) при 60 °С и 6-минутной мойке, а также повышают циклическую прочность стали на 6,5 МПа за счет подавления чисто коррозионных разрушений.

Практическая значимость работы состоит в обосновании рекомендаций по применению тетраборфосфатов, особенно ТБФК, в качестве эффективных моюще-пассивирующих добавок к водным растворам для защиты рабочих органов сельскохозяйственных машин в период межсезонного хранения. Перспективой исследования является изучение защитного действия ТБФС на другие конструкционные стали в реальных условиях хранения техники, а также разработка технологических регламентов их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Фадеев И.В. Разработка нового средства для защиты сельскохозяйственных машин при хранении. *Техника и оборудование для села*. 2019;(6):38–42. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-38-42>
2. Фадеев И.В., Успенский И.А., Ушанев А.И., Степанова Е.И., Воронов В.П. Повышение эффективности технологии нанесения противокоррозионного состава при постановке сельскохозяйственных машин на хранение. *Техника и оборудование для села*. 2022;(1):39–42. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-39-42>
3. Садетдинов Ш.В., Пестряева Л.Ш., Фадеев И.В., Пестряев Д.А. Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали с помощью дипинаконборатных соединений. *Черные металлы*. 2020;(11):40–45. <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.06>
4. Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Жирков Е.Н., Стрельников И.А., Садетдинов Ш.В. Исследование влияния боратфосфатов на свойства графитовых противопопригарных покрытий.

- Литейщик России*. 2022;(4):34–37. URL: <http://www.ruscastings.ru/work/396/6988/9882> (дата обращения: 15.07.2025).
5. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2014;(4):17–21. URL: <https://madi.ru/1636-vestnik-moskovskogo-atomobilno-dorozhnogo-gosudarstvennogo.html> (дата обращения: 15.07.2025).
 6. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Гартфельдер В.А. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах. *Черные металлы*. 2018;(5):47–53. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1721/article/29533/?language=ru> (дата обращения: 15.07.2025).
 7. Смирнов А.Г., Максимов И.И., Калимуллин М.Н. Использование биоразлагаемых материалов для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2025;20(1):75–81. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2025-1-75-81>
 8. Илларионов И.Е., Жирков Е.Н., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Разработка торфосодержащих смесей для теплоизоляции приливов отливок с использованием аминокислотных комплексов. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021;19(11):483–486. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2021-19-11-483-486>
 9. Бышов Н.В., Успенский И.А., Алексеев В.В., Фадеев И.В. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(2):295–305. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>
 10. Thomas P., Sahoo B.N., Thomas P.J., Greve M.M. Recent Advances in Emerging Integrated Anticorrosion and Antifouling Nanomaterial-Based Coating Solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;(31):67550–67576. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33825-6>
 11. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. Ionic liquids As Green and Sustainable Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys: An Overview. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;(233):403–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>
 12. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Влияние дипинаконборатов на коррозионную стойкость стали Ст3 в растворах синтетических моющих средств. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(3):131–134. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-3-131-134>
 13. Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Садетдинов Ш.В. Моисеева О.В., Королев А.В. Влияние борной кислоты на свойства теплоизоляционных смесей. *Литейное производство*. 2019;(1):24–26. <https://www.elibrary.ru/ysgyel>
 14. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Модифицирование технических лигносульфонатов некоторыми аминокислотными комплексами. *Литейное производство*. 2021;(2):20–22. <https://www.elibrary.ru/veuxtp>
 15. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Коррозионные характеристики углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020;16(3):112–115. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-3-112-115>
 16. Смирнов А.Г., Гордеев А.А., Семенов А.В. Исследование коррозионной активности формата натрия и бишофита в составе комплексного противогололедного материала по отношению к оцинкованным покрытиям стальных деталей. *Вестник Чувашского ГАУ*. 2025;(1):214–220. <https://doi.org/10.48612/vch/anh9-fb88-51kb>
 17. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В. Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей. *Черные металлы*. 2019;(4):67–72. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/1813/article/30950/> (дата обращения: 13.08.2025).
 18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Оценка вероятности возникновения электрохимической коррозии при формировании микроплазменных оксидных покрытий. *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2025;(3):5–15. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-3-5-15>

19. Шемякин А.В., Стекольников Ю.А., Успенский И.А., Юхин И.А., Фомин С.Д., Пухов Е.В. и др. Гальванические покрытия Fe-Ni-р для восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники и технологического оборудования. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024;(3):302–309. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-35>

REFERENCES

1. Byshov N.V., Borychev S.N., Uspensky I.A., Fadeev I.V. Development of New Means to Protect Agricultural Machinery During the Storage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(6):38–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-6-38-42>
2. Fadeev I.V., Uspensky I.A., Ushanev A.I., Stepanova E.I., Voronov V.P. Increasing the Efficiency of Anti-Corrosion Application Technology When Delivering Agricultural Machines for Storage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(1):39–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-1-39-42>
3. Sadetdinov Sh.V., Pestryaeva L.Sh., Fadeev I.V., Pestryaev D.A. Increasing the Corrosion Resistance of Carbon Steel by Means of Dipinaconborate Compounds. *Chernye Metally*. 2020;(11):40–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.06>
4. Illarionov I.E., Gilmanshina T.R., Zhirkov E.N., Strelnikov I.A., Sadetdinov Sh.V. Investigation of the Effect of Boratophosphates on Properties of Graphite Non-Stick Coatings. *Russian Foundryman*. 2022;(4):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://www.ruscastings.ru/work/396/6988/9882> (accessed 15.07.2025).
5. Fadeev I.V., Novoselov A.M., Sadetdinov Sh.V. Theoretical Foundations of the Development of New Corrosion Inhibitors for the Motor Complex. *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Bulletin*. 2014;(4):17–21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://madi.ru/1636-vestnik-moskovskogo-avtomobilno-dorozhnogo-gosudarstvennogo.html> (accessed 15.07.2025).
6. Illarionov I.E., Sadetdinov Sh.V., Strelnikov I.A., Gartfelder V.A. [Influence of Phosphate Borate Compounds on Anti-Corrosion Stability of Carbon Steel in Neutral Water Environments]. *Chernye Metally*. 2018;(5):47–53. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1721/article/29533/?language=ru> (accessed: 15.07.2025).
7. Smirnov A.G., Maksimov I.I., Kalimullin M.N. Using Biodegradable Materials to Protect Agricultural Machinery from Corrosion. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2025;20(1):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2025-1-75-81>
8. Illarionov I.E., Zhirkov E.N., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Development of Peat-Containing Mixtures for Thermal Insulation of Casting Heads Using Aminoborate Complexes. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2021;19(11):483–486. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2021-19-11-483-486>
9. Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., Fadeev I.V. Changing the Contact Wetting Angles When Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):295–305. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>
10. Thomas P., Sahoo B.N., Thomas P.J., Greve M.M. Recent Advances in Emerging Integrated Anticorrosion and Antifouling Nanomaterial-Based Coating Solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;(31):67550–67576. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33825-6>
11. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A. Ionic liquids As Green and Sustainable Corrosion Inhibitors for Metals and Alloys: An Overview. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;(233):403–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>
12. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Influence of Dipinaconborates on the Corrosion Resistance of St3 Steel in Synthetic Detergent Solutions. *Hardening Technologies and Coatings*. 2021;17(3):131–134. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-3-131-134>

13. Illarionov I.E., Strelnikov I.A., Sadetdinov Sh.V., Moiseeva O.V., Korolev A.V. Influence of Boric Acid on Characteristics of Thermal Insulation Mixtures. *Foundry. Technology and Equipment*. 2019;(1):24–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ysgycl>
14. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Modification of Technical Lignosulfonates with Some Aminoborate Complexes. *Foundry. Technology and Equipment*. 2021;(2):20–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/veuxtp>
15. Strelnikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Corrosion Characteristics of Carbon Steel in Solutions of Synthetic Detergents. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020;16(3):112–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2020-16-3-112-115>
16. Smirnov A.G., Gordeev A.A., Semenov A.V. Study of Corrosion Activity of Sodium Formate and Bischofite as Part of Complex Anti-Icing Material in Relation to Galvanized Coatings of Steel Parts. *Vestnik Chuvash SAU*. 2025;(1):214–220. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.48612/vch/anh9-fb88-51kb>
17. Illarionov I.E., Sadetdinov Sh.V. Corrosion of Ferrous Metals in Environments Imitated the Conditions of Vehicles Operation. *Chernye Metally*. 2019;(4):67–72. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1813/article/30950/> (accessed 13.08.2025).
18. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Assessment of the Probability of Electrochemical Corrosion During the Formation of Microplasma Oxide Coatings. *Vestnik TvSTU. Series: Technical Sciences*. 2025;(3):5–15. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-3-5-15>
19. Shemyakin A.V., Stekolnikov Yu.A., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Fomin S.D., Pukhov E.V., et al. Fe-Ni-P Galvanic Coatings for Restoration of Worn Parts of Agricultural Machinery and Technological Equipment. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2024;(3):302–309. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-35>

Об авторах:

Фадеев Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технических дисциплин Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева» (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Петров Станислав Робертович, магистрант Чувашского государственного аграрного университета (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0639-4274>, Researcher ID: OMM-3236-2025, staspetrov21@mail.ru

Казарин Александр Сергеевич, независимый исследователь, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-8563>, Researcher ID: ONJ-2793-2025, frady@inbox.ru

Вклад авторов:

И. В. Фадеев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование замысла идеи исследования, целей и задач.

И. А. Успенский – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

М. Н. Чаткин – разработка методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

И. А. Юхин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

С. Р. Петров – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

А. С. Казарин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 24.10.2025; поступила после рецензирования 18.11.2025;
принята к публикации 24.11.2025*

About the authors:

Ivan V. Fadeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Mechanical Engineering Chair, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marksa St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, Researcher ID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Ivan A. Uspensky, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of Technical Operation of Transport Chair, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automotive and Tractor Engineering and Thermal Power Engineering, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Stanislav R. Petrov, Master's student, Chuvash State Agrarian University (29 K. Marksa St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0639-4274>, Researcher ID: OMM-3236-2025, staspetrov21@mail.ru

Alexander S. Kazarin, Independent Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-8563>, Researcher ID: ONJ-2793-2025, frady@inbox.ru

Contribution of the authors:

I. V. Fadeev – oversight and leadership responsibility for the study activity planning and executing, including mentorship external to the core team; formulating the study ideas, aims and objectives.

I. A. Uspensky – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

M. N. Chatkin – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

I. A. Yukhin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

S. R. Petrov – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

A. S. Kazarin – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 24.10.2025; revised 18.11.2025; accepted 24.11.2025