

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572>

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

УДК 620.193/.197:629.7.035.5

Оригинальная статья / Original article

Снижение коррозионной активности противообледенительной жидкости для обработки воздушных судов перед полетом

И. В. Фадеев¹✉, А. В. Шемякин², И. А. Успенский²,
М. Н. Чаткин³, И. А. Юхин²

¹ Чувашский государственный педагогический
университет имени И. Я. Яковлева,

г. Чебоксары, Российская Федерация

² Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П. А. Костычева,

г. Рязань, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,

г. Саранск, Российская Федерация

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru

Аннотация

Введение. Противообледенительные жидкости для обработки воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов перед полетом содержат гликоли, поверхностно-активные вещества, загустители и ингибиторы коррозии, которые обеспечивают их функциональные свойства, но негативно воздействуют на элементы конструкции воздушных судов, снижая коррозионную стойкость и механические характеристики, и окружающую среду. Следовательно, токсичные ингибиторы в составе противообледенительной жидкости необходимо заменить на нетоксичные, на чем основана актуальность настоящего исследования.

Цель исследования. Обоснование возможности применения монобората калия как ингибитора коррозии и снижения токсичности противообледенительной жидкости.

Материалы и методы. Образцы из сплава В95пч в течение 30 суток выдерживали в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 без и с моноборатом калия концентрацией от 0 до 6,0 г/л, затем извлекали, очищали от продуктов коррозии, взвешивали. Ингибиторные свойства оценивали по потерям массы образцов, рассчитывали скорость коррозии, ингибиторный эффект, степень защиты. Для изучения эффективности действия монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава снимали кривые циклической прочности образцов.

© Фадеев И. В., Шемякин А. В., Успенский И. А., Чаткин М. Н., Юхин И. А., 2025



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

Результаты исследования. Лучшие ингибиторные свойства монобората калия в 50%-м растворе Maxflight 04 проявляются при концентрации 5 г/л, что подтверждает оптимальность такой концентрации. Коррозионно-усталостные испытания показали, что моноборат калия концентрацией 5 г/л в растворе Maxflight 04 увеличивает циклическую прочность сплава.

Обсуждение и заключение. Моноборат калия является эффективным ингибитором в составе противообледенительной жидкости. Он практически не оказывает вредного воздействия на организм человека и окружающую среду, относится к 4-му классу опасности. Практическая значимость работы заключается в том, что введение монобората калия в состав противообледенительной жидкости Maxflight 04 в концентрации 5 г/л обеспечивает повышение эксплуатационной надежности элементов конструкции воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов, особенно при длительной наработке и работе в условиях циклических нагрузок. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением спектра изучаемых борсодержащих соединений, а также с комплексным анализом их ингибирующих свойств в отношении алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, применяемых в авиационной технике.

Ключевые слова: воздушное судно, беспилотные летательные аппараты, противообледенительная жидкость, сплав В95пч, коррозия, ингибитор коррозии, циклическая прочность, моноборат калия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фадеев И.В., Шемякин А.В., Успенский И.А., Чаткин М.Н., Юхин И.А. Снижение коррозионной активности противообледенительной жидкости для обработки воздушных судов перед полетом. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):554–572. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572>

Reducing Corrosive Activity of Deicing Liquid for Pre-Flight Treatment of Aircraft

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

^a *Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovlev, Cheboksary, Russian Federation*

^b *Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation*

^c *National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation*

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru

Abstract

Introduction. Deicing liquids for pre-flight treatment of aircraft and unmanned aerial vehicles contain glycols, surfactants, thickeners and corrosion inhibitors, which provide their functional properties, but have a negative impact on the aircraft structural elements reducing corrosion resistance and mechanical characteristics, and on the environment. Therefore, toxic inhibitors in the deicing liquids should be replaced with non-toxic ones that explain the relevance of the study.

Aim of the Study. The study is aimed at justifying the possibility of using potassium monoborate as a corrosion inhibitor to reduce the toxicity of the deicing liquids.

Materials and Methods. For 30 days the samples of the V95pch alloy were kept in a 50% solution of the deicing liquids Maxflight 04 without potassium monoborate and with potassium monoborate with a concentration of 0 to 6.0 g/l, and then the samples were removed, cleaned of corrosion products, and weighed. Inhibitory properties were assessed by the mass loss of samples; there were calculated the corrosion rate, inhibitory effect, and degree of protection. To study the effect of the potassium monoborate on the corrosion-fatigue strength of the alloy, there were recorded cyclic strength curves of the samples.

Results. The best inhibitory properties of potassium monoborate in the 50% Maxflight 04 solution manifest themselves at a concentration of 5 g/l that confirms the optimality of this concentration. Corrosion-fatigue tests have shown that potassium monoborate at a concentration of 5 g/l in the Maxflight 04 solution increases the cyclic strength of the alloy.

Discussion and Conclusion. Potassium monoborate is an effective inhibitor in the composition of the deicing liquids. It has no harmful effects on the human body and environment, and belongs to the 4th hazard class. The practical significance of the study is that the introduction of potassium monoborate into the composition of the deicing liquids Maxflight 04 at a concentration of 5 g/l ensures an increase in the serviceability of the structural elements of aircraft and unmanned aerial vehicles, especially during long-term operation and work under cyclic loads. Further research prospects are concerned with expanding the range of boron-containing compounds under study, and with a comprehensive analysis of their inhibitory properties to use these compounds in aluminum, magnesium and titanium alloys used in aviation technology.

Keywords: aircraft, unmanned aerial vehicles, deicing liquid, V95pch alloy, corrosion, corrosion inhibitor, cyclic strength, potassium monoborate

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

For citation: Fadeev I.V., Shemyakin A.V., Uspensky I.A., Chatkin M.N., Yukhin I.A. Reducing Corrosion Activity of Deicing Liquid for Pre-Flight Treatment of Aircraft. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):554–572. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.554-572>

ВВЕДЕНИЕ

Наземная противообледенительная обработка внешних поверхностей воздушного судна (ВС) противообледенительной жидкостью (ПОЖ) регламентируется международными¹ и российскими² стандартами и необходима для обеспечения безопасности полетов. Основная функция ПОЖ заключается в удалении снежно-ледяных отложений (в нагретом до +60...+70 °С виде) и предотвращении их повторного образования (в холодном виде) [1]. Применяемые жидкости классифицируются на ньютоновские (I тип) и неньютоновские (II, III и IV типы), что обуславливает разную длительность их защитного эффекта. Жидкости I типа предназначены для применения в нагретом виде в основном для удаления снежно-ледяных отложений с поверхностей ВС и кратковременной защиты ВС. Для долговременной защиты используются жидкости II, III и IV типов.

¹ ISO 11076:2020. Aircraft – Deicing/Anti-Icing Methods on the Ground [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/74304.html> (дата обращения: 21.10.2024).

² ГОСТ Р 54264-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Методы и процедуры противообледенительной обработки самолетов. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085982> (дата обращения: 21.10.2024).

Из-за присутствия в их составе загустителя они имеют большую вязкость и образуют на поверхности пленку, принимающую на себя осадки и препятствующую их примерзанию к поверхности ВС [2].

Состав ПОЖ определяется их функциональным назначением и включает в себя гликоли (до 95 %) [3], антикоррозионные добавки [4; 5], поверхностно-активные вещества (ПАВ) [6; 7], загустители [2] и вспомогательные компоненты. Из-за наличия гликоля ПОЖ имеет температуру замерзания значительно ниже, чем у воды (до -60 °C) [3].

Однако гликоли и некоторые другие компоненты обладают высокой коррозионной активностью и токсичностью [3; 4; 7], что приводит к ускорению процессов коррозии и усталостного разрушения конструкционных материалов ВС. Это особенно критично для ВС с большой наработкой, у которых присутствие скрытых очагов коррозии и усталостных повреждений увеличивает риск аварийных ситуаций. Известны катастрофы, связанные с усталостным разрушением элементов конструкции ВС.

Вопрос обработки ПОЖ актуален и для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), дронов и малой авиации, которые находят все более широкое применение в различных отраслях, включая сельское хозяйство. Использование данных аппаратов является одним из наиболее перспективных направлений, так как они обеспечивают высокую эффективность в сборе и анализе данных. Для достижения максимальной продуктивности в сельском хозяйстве важно обладать своевременной и точной информацией о характере территории, включая площадь, рельеф и особенности почвы. Одним из наиболее эффективных методов получения таких данных является применение беспилотников. В ходе короткого полета они могут собирать детализированную информацию об исследуемом объекте, формировать ортофотопланы, выполнить аэрофото- и видеосъемку, проводить тепловизионную съемку, создавать трехмерные модели рельефа, осуществлять лазерное сканирование, а также выполнять обработку растений и плодовых деревьев с помощью опрыскивания. Эти возможности БПЛА позволяют оперативно контролировать сельскохозяйственные процессы на полях и принимать обоснованные решения для их оптимизации.

В сельском хозяйстве используют два вида БПЛА: самолетного типа, характеризующиеся высокими аэродинамическими показателями, удобные для облета больших территорий, и коптерные беспилотники или дроны для точечной съемки, обследования небольшого земельного участка, трехмерного моделирования, обработки полей опрыскиванием.

После нанесения ПОЖ на поверхностях БПЛА образуется противообледенительное тонкое покрытие с противoadгезионными и противокоррозионными свойствами, устойчивое к воздействию низких температур, которое уменьшает обледенение обработанных поверхностей, облегчает очистку от мокрого снега и льда.

При обработке самолета 75–80 % состава стекает на землю [8], часть сдувается ветром во время взлета ВС. Это негативно влияет на окружающую среду, что обуславливает необходимость повышения экологических свойств ПОЖ [3; 4; 6].

В первую очередь желательно заменить входящие в состав ПОЖ токсичные ингибиторы коррозии на нетоксичные, поэтому исследования по разработке эффективных и нетоксичных ингибиторов коррозии являются актуальными и востребованными. В качестве такого ингибитора коррозии впервые предлагается использовать монобورات калия (KBO_2) (МБК), что составляет научную новизну исследования.

Цель исследования – доказать возможность применения МБК в качестве эффективного и экологически безвредного ингибитора коррозии в составе ПОЖ для снижения интенсивности коррозионных и коррозионно-усталостных процессов, протекающих в элементах конструкции ВС под воздействием ПОЖ.

Задачи: проанализировать информацию по теме исследования и выбрать пути реализации цели; исследовать влияние МБК на коррозионные характеристики ПОЖ; на основе полученных данных сформулировать выводы и разработать рекомендации по повышению экологичности и улучшению коррозионной характеристики ПОЖ.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные исследования в области разработки ПОЖ акцентируют внимание на двух ключевых проблемах: обеспечении высокой эффективности удаления и предотвращения образования наледи и снижении их токсичности и коррозионной активности. Согласно ГОСТ Р 54264-2010³ и Международному авиационному стандарту⁴ ПОЖ должны одновременно обеспечивать безопасность полетов и соответствовать экологическим требованиям.

Наиболее распространенными компонентами ПОЖ являются гликоли, ПАВ, загустители и антикоррозионные добавки [2; 3; 6]. Однако в ряде работ отмечено, что гликоли обладают высокой коррозионной активностью, а их продукты разложения оказывают токсическое воздействие на окружающую среду [3; 8]. Аналогичные результаты приводят зарубежные авторы: исследования в США и Европе показали значительное накопление пропилен- и этиленгликоля в почвах и водоемах вблизи аэропортов, что приводит к деградации экосистем [9–11].

Коррозионная активность ПОЖ остается одной из наиболее актуальных проблем их применения. Российские ученые подчеркивают необходимость замены традиционных ингибиторов (например, на основе нитритов и аминосоединений), которые снижают прочностные характеристики алюминиевых сплавов и ускоряют усталостное разрушение [4; 5; 12]. Зарубежные публикации также подтверждают, что использование традиционных органических ингибиторов приводит к снижению долговечности алюминиевых и магниевых сплавов, широко применяемых в авиации [13; 14].

Одним из направлений снижения агрессивности ПОЖ является применение новых классов ингибиторов коррозии. В Российской Федерации активно изучаются соединения калия и бора, в том числе амидоборатные комплексы и соли

³ ГОСТ Р 54264-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Методы и процедуры противообледенительной обработки самолетов. Общие требования.

⁴ ISO 11076:2020. Aircraft – Deicing/Anti-Icing Methods on the Ground.

щелочных металлов [15–17]. Эти работы показали, что борсодержащие соединения способны замедлять электрохимические процессы коррозии и одновременно снижать токсичность рабочих растворов. В международной практике также рассматриваются перспективы использования неорганических ингибиторов на основе бора и фосфатов, обладающих низкой экологической опасностью [18; 19]. При этом зарубежные исследования отмечают необходимость оптимизации концентраций – при превышении определенных доз некоторые соединения утрачивают ингибирующую способность или изменяют реологические свойства жидкостей. Схожий эффект выявлен и в настоящем исследовании для МБК, оптимальная концентрация которого составляет 5 г/л.

Существенная часть исследований посвящена влиянию ПАВ и загустителей на эксплуатационные свойства ПОЖ. Российские исследования [6; 7; 20] показали, что правильный подбор этих компонентов определяет вязкость, смачиваемость и адгезионные характеристики покрытий. Аналогичные выводы приводятся в зарубежных публикациях: модифицированные полимерные загустители и биоразлагаемые ПАВ способны одновременно повышать продолжительность защитного эффекта и снижать токсичность жидкости [21–23].

С экологической точки зрения актуальна проблема утилизации ПОЖ. При наземной обработке ВС до 80 % жидкости попадает на грунт, загрязняя его [8; 24]. Аналогичные выводы приводятся в работах европейских ученых, подтверждающих, что главным источником техногенной нагрузки аэропортов в зимний период являются именно стоки ПОЖ [25; 26]. Это определяет необходимость разработки составов на основе биоразлагаемых ингибиторов.

Таким образом, анализ литературы показывает следующее:

- проблема токсичности и коррозионной активности ПОЖ признана как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях;
- классические ингибиторы (нитриты, аминокомпоненты) постепенно заменяются экологически безопасными соединениями на основе бора, фосфатов и калия;
- остается открытым вопрос поиска оптимальных концентраций и сочетаний компонентов, обеспечивающих одновременно высокие противообледенительные, антикоррозионные и экологические свойства;
- недостаточно исследовано влияние новых ингибиторов на усталостную прочность алюминиевых авиационных сплавов, что и составляет основной вклад рассматриваемой работы.

Именно на решение этих вопросов и проверку эффективности МБК как ингибитора коррозии в составе ПОЖ и его влияния на коррозионно-усталостные характеристики авиационных сплавов направлено настоящее исследование.

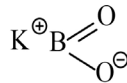
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы исследования

В российских аэропортах и в аэропортах Московского авиационного узла в основном используются ПОЖ OctafloEG, отнесенная к типу I, и Maxflight 04 на основе пропиленгликоля, деионизированной воды, загустителя и функциональных химических компонентов, отнесенная к типу IV [8].

ПОЖ Maxflight 04 соответствует требованиям международных и российских стандартов, сертифицирована в системе ГОСТ Р, допущена Росавиацией к применению на самолетах. Выпускается по техническим условиям ТУ 2422-002-70090832-2007 с изм. № 1 и 2 и поставляется в авиапредприятия Российской Федерации и Государств Евразийского Союза⁵ с 2006 г. Из ГОСТ 12.1.007.76⁶ и источника⁷ известно, что по степени воздействия на организм человека Maxflight 04 относится к 4-му классу опасности.

Выбор МБК в качестве ингибитора коррозии был основан на предварительном патентном исследовании ингибиторов, содержащих калий. Проведенный анализ показал, что соединения калия обладают антикоррозионными свойствами, что делает их перспективными для применения в качестве ингибиторов коррозии. Дополнительный обзор литературных источников [13–15] подтвердил, что отдельные борсодержащие соединения проявляют смачивающие и ингибирующие свойства в водных средах, а также являются экологически безопасными добавками (относятся к 4-му классу опасности) и могут быть использованы для снижения коррозионной активности растворов технических жидкостей. На основе изложенного в работе в качестве ингибитора коррозии исследован МБК, имеющий следующую структурную схему [12]:



Моноборат калия (порошок, молекулярная масса 81,9 г/моль)
Potassium monoborate (powder, molecular weight 81.9 g/mol)

Методы исследования ингибиторных свойств монобората калия

Эксперименты проводились с образцами 100×30×2 мм из алюминиевого сплава В95пч, широко используемого в авиастроении [8], ПОЖ Maxflight 04 и МБК.

В каждом опыте было по три образца, что соответствует количеству параллельных опытов. Образцы были изготовлены из листового материала сплава В95пч одной партии с использованием гильотинных механических ножниц, что обеспечивало их идентичность по химическому составу, структуре и механическим характеристикам. Для подготовки поверхности осуществлялось удаление заусенцев, первичных продуктов коррозии и окислы механическим способом. Далее проводилась маркировка, после чего образцы измеряли штангенциркулем с нониусной шкалой, имеющей цену деления 0,1 мм. Массу образцов определяли с помощью аналитических весов ВЛА-200 г-М, обеспечивающих точность измерений до 0,0001 г, а полученные данные фиксировались в специальной таблице.

⁵ ЭдвансНефтеХим. Max Flight 04 (тип IV) [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://clck.ru/3P2YVi> (дата обращения: 21.10.2024).

⁶ ГОСТ 12.1.007.76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200233> (дата обращения: 21.10.2024)

⁷ ЭдвансНефтеХим. Max Flight 04 (тип IV).

Перед проведением дальнейших исследований образцы подвергались обезжириванию этиловым спиртом, после чего высушивались и хранились в эксикаторах с силикагелем для предотвращения воздействия влаги. Испытания проводились в растворах ПОЖ Maxflight 04 без и с добавлением МБК (концентрациями 1,0–6,0 г/л). Вертикально подвешенные образцы выдерживались в растворах при комнатной температуре (20–22 °С) в течение 30 сут. Объем растворов был не менее 10–15 см³ на 1 см² образца.

Концентрация ПОЖ Maxflight 04 в ее водном растворе составляла 50 %. Оценка ингибиторной эффективности проводилась на основе анализа уменьшения массы образцов, которые подвергались воздействию исследуемых растворов в течение 30 сут. Контролем служил 50%-й водный раствор ПОЖ Maxflight 04. Опыты проводились в трехкратной повторности. По полученным данным рассчитывали скорость коррозии (K), ингибиторный эффект (γ) и степень защиты (Z).

Скорость коррозионного повреждения K определяли путем измерения изменения массы образцов, отнесенного к единице площади поверхности за фиксированный интервал времени согласно формуле (1). Результаты выражали в г/м² · год [24]:

$$K = \frac{M_1 - M_2}{S \cdot T} \cdot 10\,000 \cdot 8\,760, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 – масса образца до и после испытаний, г; S – площадь поверхности образца, см²; T – время экспозиции образца в растворе электролита, ч; 10 000 – коэффициент пересчета единиц измерения площади (из м² в см²); 8 760 – общее количество часов в году.

Площадь образцов определяли по формуле:

$$S = 2[(a+b)b + ac] - \frac{\pi d^2}{2} + \pi dc, \quad (2)$$

где a , b , c – размеры образцов, см; π – математическая постоянная (3,14); d – диаметр отверстия для подвешивания образца, см.

После подстановки выражения (2) в (1) получили:

$$K = \frac{M_1 - M_2}{2[ab + (a+b)c] + \frac{\pi d^2}{2} + \pi dc} \cdot \frac{10\,000 \cdot 8\,760}{T}.$$

Результаты измерений, взвешиваний и расчетов заносили в таблицу.

Для оценки эффективности ингибитора применяли коэффициент ингибирования, вычисляемый по следующей формуле:

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

где K_0 – скорость коррозии без добавления ингибитора, г/м²·год; K – скорость коррозии в его присутствии, г/м² · год.

Степень защитного действия ингибитора, отражающую эффективность подавления коррозионного разрушения, определяли в процентах согласно соответствующей расчетной зависимости:

$$Z = \frac{K_0 - K}{K_0} 100 \%$$

Методы исследования влияния монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч

Элементы конструкции ВС работают в условиях коррозионного разрушения и воздействия на них циклических напряжений [4]. Для оценки влияния МБК на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч использовалась методика, представленная в [12]. Испытания проводились на образцах в условиях воздействия циклических нагрузок и коррозионной среды, что имитировало эксплуатационные условия конструктивных элементов воздушных судов.

Для количественной характеристики влияния коррозии на металлы при циклических нагрузках применяют коэффициент запаса циклической прочности на заданной базе испытаний ($\Delta\sigma_N^c$), а также показатель циклической долговечности материала, определяемый числом циклов до разрушения (N).

Для оценки влияния ингибиторов на коррозионно-усталостную прочность металлов необходимо построить кривые долговременной циклической прочности. При проведении испытаний использовали специализированную установку, аналогичную описанной в работе [7]. Образцы из сплава В95пч фиксировали в установке с использованием специальных крепежных элементов, помещая их в сосуд из органического стекла, заполненный испытуемым раствором. Для формирования циклических напряжений в образцах использовали метод симметричного изгиба с частотой 500 циклов в минуту.

Внутренние напряжения определяли по выражению:

$$\sigma = \pm \frac{3Ehf}{2l^2},$$

где E – модуль упругости испытуемого материала; h – толщина образца, мм; f – амплитуда изгиба, мм; l – рабочая длина образца, мм.

Рассчитывали $\Delta\sigma_N^c$, отражающее напряжения, при которых образцы разрушались в коррозионной среде.

Сравнивая эти показатели, а также число циклов до разрушения (N) в растворах с ингибитором и без него, оценивали его эффективность.

Для анализа влияния коррозии и коррозионно-механических факторов на снижение циклической прочности металла при определенном числе циклов N использовали следующее выражение [12]:

$$\Delta\sigma_N^r = \Delta\sigma_N^{p.c.} + \Delta\sigma_N^{c-m.},$$

где $\Delta\sigma_N^r$ – общее снижение циклической прочности в коррозионной среде; $\Delta\sigma_N^{p.c.}$ – снижение циклической прочности за счет чисто коррозионных процессов; $\Delta\sigma_N^{c-m.}$ – снижение циклической прочности, обусловленное совместным воздействием коррозионных и механических факторов.

Материалы и методики для проведения экспериментов обеспечили получение объективных результатов для реализации цели исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование ингибиторных свойств монобората калия

Экспериментальные результаты, отражающие скорость коррозионного разрушения, ингибиторную эффективность и уровень защиты сплава В95пч от коррозии в течение 30 сут, представлены в таблице и на рисунках 1–3.

Увеличение присутствия МБК до 5 г/л в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 вызывает замедление скорости коррозии материала В95пч. В частности, за 30 сут она уменьшается от $10,49 \cdot 10^{-3}$ до $5,35 \cdot 10^{-3}$ г/м² · год (рис. 1), повышает ингибиторный эффект (γ) до 1,96 (рис. 2), степень защиты (Z) от коррозии до 49 % (рис. 3). При повышении его концентрации от 5 до 6 г/л ухудшаются все три характеристики, то есть наблюдается обратный эффект.

Т а б л и ц а
T a b l e

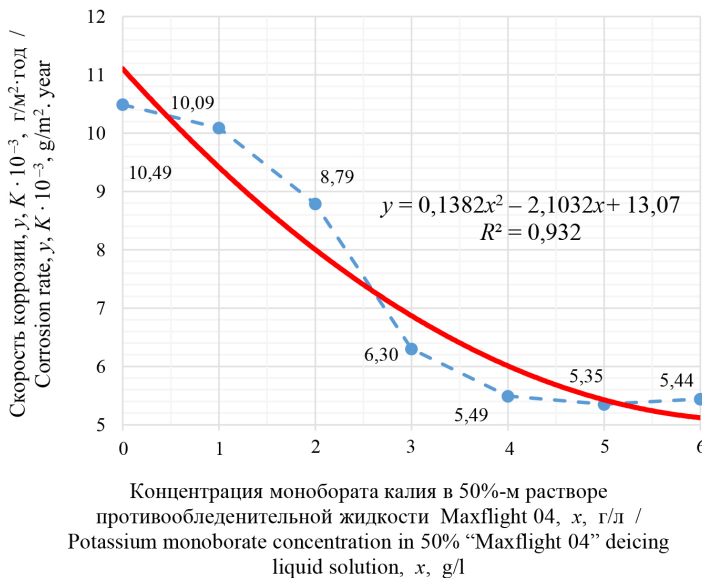
Результаты исследования ингибиторных свойств монобората калия в растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04

The results of studying the inhibitory properties of potassium monoborate in the deicing liquid solution "Maxflight 04"

№№ образцов / №№ of samples	Коррозионная среда / Corrosive environment	Концентрация монобората калия в растворе, г/л / Potassium monoborate concentration in solution, g/l	Масса образца, г / Sample weight, g		Потеря массы, $\Delta M = M_1 - M_2$, г / Weight loss, $\Delta M = M_1 - M_2$, g	Площадь образца, S, см ² / Sample area, S, cm ²	Скорость коррозии по образцам, $K_{sam}^i \cdot 10^{-3}$, г/м ² · год / Corrosion rate according to samples $K_{sam}^i \cdot 10^{-3}$, г/м ² · year	Скорость коррозии средняя по образцам, $K_{sam} \cdot 10^{-3}$, г/м ² · год / Average corrosion rate for samples $K_{sam} \cdot 10^{-3}$, г/м ² · year	Ингибиторный эффект, γ / Inhibitory effect, γ	Степень защиты, Z, % / Degree of protection, Z, %
			до опыта, M_1 / prior to experiment, M_1	после опыта, M_2 / after experiment, M_2						
1	50%-й раствор	0	16,8057	10,8953	5,9104	61,6	11,67	10,49	1,0	0
2	противообледенительной жидкости Maxflight 04 (контроль) /		16,4775	11,7565	4,7210	58,3	9,85			
3	50% solution of deicing liquid Maxflight 04 (control)		16,4787	11,5906	4,8881	59,8	9,95			

Окончание таблицы / End of table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
4	50%-й раствор противообле- денительной жидкости Maxflight 04 +	1	15,9817	10,9180	5,0637	61,0	10,11	10,09	1,04	3,8	
5			15,9538	11,0800	4,8737	59,4	9,98				
6			16,1164	11,0732	5,0431	60,3	10,18				
7	+ моноборат калия / 50% solution of deicing liquid Maxflight 04 + + potassium monoborate	2	16,5474	12,0732	4,4742	56,8	9,58	8,79	1,19	16,2	
8			16,0905	12,4463	4,3273	58,7	8,97				
9			15,9010	12,2631	3,7606	58,4	7,83				
10			16,8403	13,6958	3,1444	61,3	6,25				
11			16,7301	13,4745	3,2555	62,4	6,35				
12			16,7590	13,5220	3,2370	62,5	6,30				
13		4	16,4910	13,8720	2,6190	59,8	5,34	5,49	1,91	47,7	
14			16,7010	14,0652	2,6358	56,9	5,67				
15			16,4050	13,7396	2,6654	59,4	5,47				
16			16,3660	13,7511	2,6149	60,1	5,29				
17			16,5130	13,8780	2,6350	59,9	5,35				
18		5	16,0120	13,3481	2,6639	60,0	5,40	5,35	1,96	49,0	
19				17,0560	14,2615	2,7945	61,1				5,56
20				16,6550	13,7941	2,6609	60,5				5,35
21		6	17,5210	14,8152	2,7058	60,9	5,41	5,44	1,93	48,1	



Р и с. 1. Зависимость скорости коррозии сплава В95пч в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 от концентрации монобората калия за 30 сут:

— линия тренда (полиномиальная);

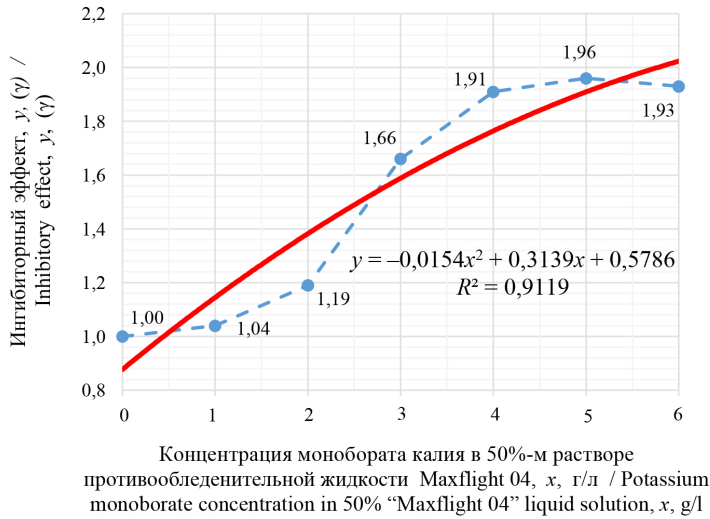
R^2 – коэффициент достоверности

Fig. 1. Corrosion rate dependence of V95pch alloy in 50% "Maxflight 04" deicing liquids solution on potassium monoborate concentration for 30 days:

— trend line (polynomial); R^2 – confidence factor

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

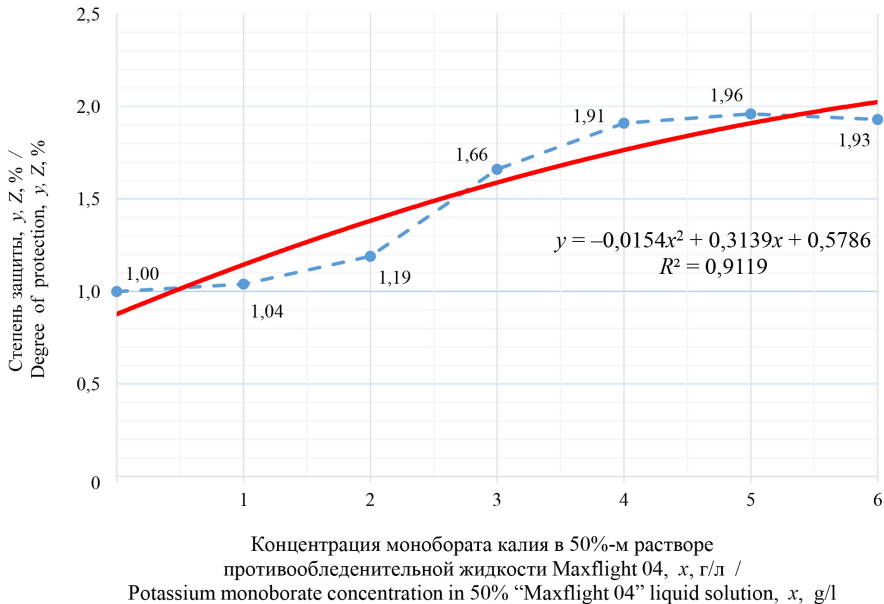


Р и с. 2. Влияние концентрации монобората калия на ингибиторный эффект в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 за 30 сут:

— линия тренда (полиномиальная); R^2 – коэффициент достоверности

F i g. 2. Effect of potassium monoborate concentration on the inhibitory effect in 50% "Maxflight 04" liquid solution for 30 days:

— trend line (polynomial) R^2 – confidence factor



Р и с. 3. Зависимость степени защиты сплава В95пч от коррозии в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 от концентрации монобората калия за 30 сут:

— линия тренда (полиномиальная); R^2 – коэффициент достоверности

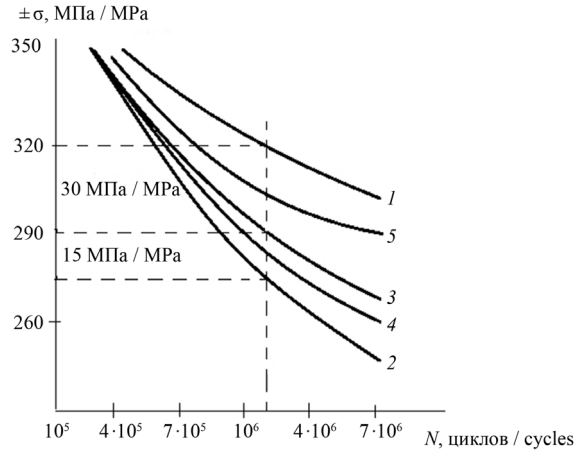
F i g. 3. Dependence of the protection degree of the V95pch alloy from corrosion in a 50% solution of "Maxflight 04" deicing liquid on the concentration of potassium monoborate for 30 days:

— trend line (polynomial); R^2 – confidence factor

Полученные результаты согласуются с данными ранее проведенных исследований других авторов [12; 15; 17], что подтверждает их достоверность и практическую значимость.

Исследование влияния монобората калия на коррозионно-усталостную прочность сплава В95пч

Графические данные, полученные в ходе исследований усталостной и коррозионно-усталостной прочности сплава В95пч в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 как без добавления МБК, так и с его присутствием, представлены на рисунке 4.



Р и с. 4. Графическое представление зависимости усталостной и коррозионно-усталостной прочности сплава В95пч:

- 1 – в атмосферных условиях; 2 – в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04; 3 – в 50%-м растворе противообледенительной жидкости Maxflight 04 с добавлением 5 г/л монобората калия; 4 – в атмосферных условиях после предварительного воздействия 50%-го раствора противообледенительной жидкости Maxflight 04; 5 – в атмосферных условиях после предварительного воздействия 50%-го раствора противообледенительной жидкости Maxflight 04 с 5 г/л монобората калия;
- σ – внутреннее напряжение металла, МПа; N – количество циклов до разрушения

F i g. 4. Graphical representation of the dependence of fatigue and corrosion-fatigue strength of the V95pch alloy:

- 1 – under atmospheric conditions; 2 – in a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04”; 3 – in a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04” with the addition of 5 g/l potassium monoborate; 4 – under atmospheric conditions after preliminary treatment with a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04”; 5 – under atmospheric conditions after preliminary treatment with a 50% solution of the deicing liquid “Maxflight 04” with 5 g/l potassium monoborate.
- σ – internal stress of the metal, MPa; N – a number of cycles before failure

Анализ кривых 1, 2 и 4 на рисунке 4 демонстрирует снижение циклической прочности металла под воздействием разрушительных факторов. Сравнительное изучение кривых 1 и 2 позволило установить, что совокупное снижение циклической прочности ($\Delta\sigma_N^r$) сплава В95пч в 50%-м растворе ПОЖ Maxflight 04 при числе циклов $N = 2 \cdot 10^6$ составляет 45 МПа.

При этом применение исследуемого ингибитора позволяет уменьшить воздействие чисто коррозионных процессов на 33,3 % ($\Delta\sigma_N^{p.c.} = 15$ МПа) и снизить

влияние коррозионно-механических повреждений на 66,6 % ($\Delta\sigma_N^{c.-m.} = 30$ МПа), что подтверждается анализом кривых 3 и 2, а также 3 и 1. Сравнительное рассмотрение кривых 2 и 3, а также 4 и 5 свидетельствует о том, что добавление МБК в концентрации 5 г/л в 50%-й раствор ПОЖ Maxflight 04 способствует повышению циклической прочности сплава В95пч. Это обусловлено ослаблением влияния разрушающих факторов на снижение циклической прочности данного материала (что видно из кривых 1, 2 и 4).

Результаты коррозионно-усталостных испытаний подтверждают, что введение МБК способствует увеличению коэффициента запаса циклической прочности сплава В95пч в исследуемых средах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о высокой эффективности МБК в качестве ингибитора коррозии в составе ПОЖ. Он способствует снижению скорости коррозионного и коррозионно-усталостного разрушения, протекающих в элементах конструкции ВС и БПЛА под воздействием ПОЖ. Результаты исследования имеют практическую значимость и вносят определенный вклад в экологическую безопасность. 5 г/л МБК в составе 50%-го раствора ПОЖ Maxflight 04 снижает скорость коррозии сплава В95пч за 30 сут от $10,49 \cdot 10^{-3}$ до $5,35 \cdot 10^{-3}$ г/м²·год, уменьшает разрушающий эффект чисто коррозионных поражений на 37,5 % ($\Delta\sigma_N^{p.c.} = 18$ МПа) и коррозионно-механических поражений на 62,5 % ($\Delta\sigma_N^{c.-m.} = 30$ МПа). Присутствие МБК в растворе ПОЖ Maxflight 04 способствует уменьшению влияния разрушительных факторов, что приводит к повышению циклической прочности сплава В95пч. Для снижения токсичности и коррозионной агрессивности ПОЖ рекомендуется использовать в их составе МБК концентрацией 5 г/л.

Практическая значимость работы заключается в том, что введение МБК в состав ПОЖ типа Maxflight 04 в концентрации 5 г/л обеспечивает повышение эксплуатационной надежности элементов конструкции ВС и БПЛА, особенно при длительной наработке и работе в условиях циклических нагрузок.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с расширением спектра изучаемых борсодержащих соединений, а также с комплексным анализом их ингибирующих свойств в отношении алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, применяемых в авиационной технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плахотникова М.А., Серебrenикова Ю.Г., Лысянников А.В., Кайзер Ю.Ф. Плошадка для сбора противообледенительной жидкости в аэропорту «Емельяново». *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015;(5–2):106–113. <https://elibrary.ru/ulfazx>
2. Куряшов Д.А., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Мингазов Р.Р., Сладовская О.Ю., Рахматуллин Р.Р. Загустители в составах противообледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета*. 2015;18(5):77–79. <https://elibrary.ru/touavp>
3. Кашапова Н.Е., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Сладовская О.Ю., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., и др. Воздействие гликолей в составе противообледенительных жидкостей на

- окружающую среду. *Вестник технологического университета*. 2015;18(5):209–212. <https://elibrary.ru/toubjl>
4. Кашапова Н.Е., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Сладовская О.Ю., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., и др. Влияние ингибиторов коррозии и ПАВ на токсикологические свойства противобледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета*. 2015;18(5):221–223. <https://elibrary.ru/toubkp>
 5. Сладовская О.Ю., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Мингазов Р.Р., Куряшов Д.А., Рахматуллин Р.Р. Ингибиторы коррозии в составах противобледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета*. 2015;18(5):84–86. <https://elibrary.ru/touawt>
 6. Румянцев М.С., Савинова М.В., Казанцев О.А., Квашенников А.И. Влияние поверхностно-активных веществ разного типа на реологические характеристики водно-гликолевых растворов полиакриловых загустителей. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. 2016;8(4):11–17. <https://doi.org/10.14529/chem160402>
 7. Мингазов Р.Р., Башкирцева Н.Ю., Овчинникова Ю.С., Куряшов Д.А., Сладовская О.Ю., Рахматуллин Р.Р. Поверхностно-активные вещества в составах противобледенительных жидкостей. *Вестник технологического университета*. 2015;18(6):85–87. <https://elibrary.ru/tsxadb>
 8. Солтанов С.Х. Экологические последствия применения противобледенительных жидкостей «OstafloEG» и «Maxflight 04» при обработке воздушных судов гражданской авиации в осенне-зимний период. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;(6–2):140–143. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.176>
 9. Breedveld G.D., Roseth R., Sparrevik M., Hartnik T., Hem L.J. Persistence of the De-Icing Additive Benzotriazole at an Abandoned Airport. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. 2003;3:91–101. <https://doi.org/10.1023/A:1023961213839>
 10. McNeill K.S., Cancilla D.A. Detection of Triazole Deicing Additives in Soil Samples from Airports with Low, Mid, and Large Volume Aircraft Deicing Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2008;82:265–269 <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0063-8>
 11. Kiss A., Fries E. Occurrence of Benzotriazoles in the Rivers Main, Hengstbach, and Hegbach (Germany). *Environmental Science and Pollution Research*. 2009;16:702–710. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0179-4>
 12. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Влияние амидоборатного комплекса на коррозию и коррозионную усталость стали Ст. 10. *Приволжский научный журнал*. 2014;(3):31–35. <https://elibrary.ru/snzksz>
 13. Cancilla D.A., Holtkamp A., Matassa L., Fang X. Isolation and Characterization of Microtox®-Active Components from Aircraft Deicing/Antiicing Fluids. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1997;16(3):430–434. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160306>
 14. Castro S., Davis L.C., Erickson L.E. Plant-Enhanced Remediation of Glycol-Based Aircraft Deicing Fluids. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2001;5(3):141–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2001\)5:3\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2001)5:3(141))
 15. Бышов Н.В., Полищук С.Д., Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Ингибитор коррозии металлов для использования при ремонте автотракторной техники. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2019;(2):265–275. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32>
 16. Бышов Н.В., Фадеев И.В., Александрова Г.А., Садетдинов Ш.В. Повышение противокоррозионных свойств растворов синтетических моющих средств для мобильной техники в АПК. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2019;(45):20–24. <https://elibrary.ru/lywytc>
 17. Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Казарин А.С. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2020;(3):365–376. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39>
 18. Corsi S. R., Harwell G. R., Geis S. W., Bergmann D. Impacts of Aircraft Deicer and Anti-Icer Runoff on Receiving Waters from Dallas/Fort Worth International Airport, Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2006;25(11):2890–2900. <https://doi.org/10.1897/06-100R.1>

19. Giger W., Schaffner C., Kohler H.-P. Benzotriazole and Tolyltriazole as Aquatic Contaminants. Input and Occurrence in Rivers and Lakes. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(23):17180965. <https://doi.org/10.1021/es061565j>
20. 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>
21. Tetteh E., Loth E., Cummings J., Loebig J. Trends of Impact Ice Adhesion on Various Surfaces. *AIAA Journal*. 2021;59(5):1870–1874. <https://doi.org/10.2514/1.J060034>
22. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P. Aquatic Toxicity of Nine Aircraft Deicer and Anti-Icer Formulations and Relative Toxicity of Additive Package Ingredients Alkylphenol Ethoxylates and 4,5-Methyl-1H-Benzotriazoles. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(23):17180996. <https://doi.org/10.1021/es0603608>
23. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P., Sheesley R.J., Failey G.G., et al. Characterization of Aircraft Deicer and Anti-Icer Components and Toxicity in Airport Snowbanks and Snowmelt Runoff. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(10):16749681. <https://doi.org/10.1021/es052028m>
24. Шемякин А.В., Фадеев И.В., Успенский И.А., Юхин И.А., Чаткин М.Н. Состав для противокоррозийной обработки деталей резьбовых соединений. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(2):256–269. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269>
25. Cancilla D.A., Baird J.C., Geis S.W., Corsi S.R. Studies of the Environmental Fate and Effect of Aircraft Deicing Fluids: Detection of 5-Methyl-1h-Benzotriazole in the Fathead Minnow (*Pimephales Promelas*). *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2003;22:12503756. [https://doi.org/10.1897/1551-5028\(2003\)022<0134:sotefa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1897/1551-5028(2003)022<0134:sotefa>2.0.co;2)
26. Castro S., Erickson L.E., Davis L.C. Natural, Cost-Effective, and Sustainable Alternatives for Treatment of Aircraft Deicing Fluid Waste. *Environmental Progress*. 2005;24(1):26–33. <https://doi.org/10.1002/ep.10059>

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-fadееv-2012@mail.ru

Шемякин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации транспортных процессов и безопасности жизнедеятельности Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, Researcher ID: AAC-8682-2022, avtodor-dec@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

Вклад авторов:

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

А. В. Шемякин – 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 – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 17.12.2024; поступила после рецензирования 09.02.2025;
принята к публикации 24.02.2025

REFERENCES

1. Plakhotnikova M.A., Serebrennikova Yu.G., Lysyannikov A.V., Kaiser Yu.F. A Service Space for Aircraft De-Icing Fluid Treatment at the “Emelyanovo” Airport. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2015;(5–2):106–113. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ulfafx>
2. Kuryashov D.A., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Mingazov R.R., Sladovskaya O.Y., Rahmatullin R.R. [Thickeners in the Compositions of Anti-Oxidizing Liquids]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):77–79. (In Russ.) <https://elibrary.ru/touavp>
3. Kashapova N.E., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Sladovskaya O.Y., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., et al. [The Effect of Glycols in the Composition of De-Icing Liquids on the Environment]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):209–212. (In Russ.) <https://elibrary.ru/toubjl>
4. Kashapova N.E., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Sladovskaya O.Y., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., et al. [Effect of Corrosion Inhibitors and Surfactants on the Toxicological Properties of Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):221–223. (In Russ.) <https://elibrary.ru/toubkq>
5. Sladovskaya O.Y., Bashkirtseva N.Y., Ovchinnikova Y.S., Mingazov R.R., Kuryashov D.A., Rahmatullin R.R. [Corrosion Inhibitors in the Compositions of Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University*. 2015;18(5):84–86. (In Russ.) <https://elibrary.ru/touawt>
6. Rummyantsev M.S., Savinova M.V., Kazantsev O.A., Kvashennikov A.I. Influence of Different Surfactants on Rheological Characteristics of Water-Glycol Solutions of Polyacrylic Thickeners. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry*. 2016;8(4):11–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14529/chem160402>
7. Mingazov R.R., Bashkirtseva N.Yu., Ovchinnikova Yu.S., Kuryashov D.A., Sladovskaya O.Yu., Rahmatullin R.R. [Surfactants in Anti-Icing Fluids]. *Herald of Technological University*. 2015;18(6):85–87. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tsxadb>
8. Soltanov S.Kh. The Ecological Consequences from Applying of De-Icing and Anti-Icing Liquids “Octaflo Eg” and “Maxflight 04” in the Processing of Civil Aircrafts in Autumn-Winter Period. *International Research Journal*. 2016;(6–2):140–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.176>
9. Breedveld G.D., Roseth R., Sparrevik M., Hartnik T., Hem L.J. Persistence of the De-Icing Additive Benzotriazole at an Abandoned Airport. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. 2003;3:91–101. <https://doi.org/10.1023/A:1023961213839>

10. McNeill K.S., Cancilla D.A. Detection of Triazole Deicing Additives in Soil Samples from Airports with Low, Mid, and Large Volume Aircraft Deicing Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2008;82:265–269 <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0063-8>
11. Kiss A., Fries E. Occurrence of Benzotriazoles in the Rivers Main, Hengstbach, and Hegbach (Germany). *Environmental Science and Pollution Research*. 2009;16:702–710. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0179-4>
12. Fadeev I.V., Novoselov A.M., Sadetdinov Sh.V. The Amido-Borate Compounds Impact on the Corrosion and Corrosion Fatigue of Steel. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014;(3):31–35. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/snzksz>
13. Cancilla D.A., Holtkamp A., Matassa L., Fang X. Isolation and Characterization of Microtox®-Active Components from Aircraft Deicing/Antiicing Fluids. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1997;16(3):430–434. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160306>
14. Castro S., Davis L.C., Erickson L.E. Plant-Enhanced Remediation of Glycol-Based Aircraft Deicing Fluids. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2001;5(3):141–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2001\)5:3\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2001)5:3(141))
15. Byshov N.V., Polischuk S.D., Fadeev I.V., Sadetdinov Sh.V. Inhibitor of Metal Corrosion for Use During Repairing Automotive Equipment. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2019;(2):265–275. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32>
16. Bishov N.V., Fadeev I.V., Alexandrova G.A., Sadaddinov Sh.V. Improving Anti-Corrosive Properties Solutions of Synthetic Detergents for Mobile Equipment in Agriculture. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2019;(45):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/lywytc>
17. Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestrjaeva L.Sh., Sadatdinov Sh.V., Kazarin A.S. New Corrosion Inhibitors for the Protection of Agricultural Machinery. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020;(3):365–376. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39>
18. Corsi S.R., Harwell G.R., Geis S.W., Bergmann D. Impacts of Aircraft Deicer and Anti-Icer Runoff on Receiving Waters from Dallas/Fort Worth International Airport, Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2006;25(11):2890–2900. <https://doi.org/10.1897/06-100R.1>
19. Giger W., Schaffner C., Kohler H.-P. Benzotriazole and Tolyltriazole as Aquatic Contaminants. Input and Occurrence in Rivers and Lakes. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(23):17180965. <https://doi.org/10.1021/es061565j>
20. 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>
21. Tetteh E., Loth E., Cummings J., Loebig J. Trends of Impact Ice Adhesion on Various Surfaces. *AIAA Journal*. 2021;59(5):1870–1874. <https://doi.org/10.2514/1.J060034>
22. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P. Aquatic Toxicity of Nine Aircraft Deicer and Anti-Icer Formulations and Relative Toxicity of Additive Package Ingredients Alkylphenol Ethoxylates and 4,5-Methyl-1H-Benzotriazoles. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(23):17180996. <https://doi.org/10.1021/es0603608>
23. Corsi S.R., Geis S.W., Loyo-Rosales J.E., Rice C.P., Sheesley R.I., Failey G.G., et al. Characterization of Aircraft Deicer and Anti-Icer Components and Toxicity in Airport Snowbanks and Snowmelt Runoff. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(10):16749681. <https://doi.org/10.1021/es052028m>
24. Shemyakin A.V., Fadeev I.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Chatkin M.N. Composition for Anticorrosive Treatment of Parts of Threaded Connections. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):256–269. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269>
25. Cancilla D.A., Baird J.C., Geis S.W., Corsi S.R. Studies of the Environmental Fate and Effect of Aircraft Deicing Fluids: Detection of 5-Methyl-1h-Benzotriazole in the Fathead Minnow

- (Pimephales Promelas). *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2003;22:12503756. [https://doi.org/10.1897/1551-5028\(2003\)022<0134:sotefa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1897/1551-5028(2003)022<0134:sotefa>2.0.co;2)
26. Castro S., Erickson L.E., Davis L.C. Natural, Cost-Effective, and Sustainable Alternatives for Treatment of Aircraft Deicing Fluid Waste. *Environmental Progress*. 2005;24(1):26–33. <https://doi.org/10.1002/ep.10059>

About the authors:

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

Alexander V. Shemyakin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Organization of Transport Processes and Life Safety, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, Researcher ID: AAC-8682-2022, avtodor-dec@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

Contribution of the authors:

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

A. V. Shemyakin – oversight and leadership responsibility for the research 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 – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 17.12.2024; revised 09.02.2025; accepted 24.02.2025