

*Доценко Владимир Алексеевич,
ассистент кафедры ВСиАД,
Ростовский филиал ФГБОУ ВО МГТУ ГА,
г. Ростов-на-Дону,
Феофанов Александр Дмитриевич,
ассистент кафедры ВСиАД,
Ростовский филиал ФГБОУ ВО МГТУ ГА,
г. Ростов-на-Дону,*

**К ВОПРОСУ О ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПУТЁМ
МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВИНТОВ**

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обледенения беспилотных авиационных систем (БАС), которая оказывает существенное влияние на лётно-технические характеристики и безопасность выполнения полётных заданий. Отмечается, что традиционные методы противообледенительной защиты, применяемые в гражданской авиации (химические, воздушно-тепловые, механические), в большинстве случаев не могут быть напрямую перенесены на БАС в силу конструктивных ограничений, отсутствия источников тепла и ограниченности массогабаритных параметров. В качестве наиболее перспективного направления предложен переход от активной борьбы с уже образовавшимся льдом к превентивному недопущению его формирования. Обоснована целесообразность изменения шероховатости поверхности винтов и снижения коэффициента сцепления с влагой путём комбинированной механической и химической обработки, включая применение гидрофобизирующих составов, жидкого стекла и керамических покрытий.

Сделан вывод о том, что интеграция методов механического сглаживания и химической полировки с последующим нанесением защитных покрытий позволяет достичь максимальной эффективности в предотвращении обледенения БАС.

Ключевые слова: *беспилотные авиационные системы (БАС), обледенение, противообледенительные системы (ПОС), аэродинамические поверхности, шероховатость поверхности, гидрофобизация, керамические покрытия, жидкое стекло, безопасность полётов.*

ON THE QUESTION OF PREVENTING UNMANNED AERIAL SYSTEMS ICE ACCUMULATION BY MODIFFERING THE PROPELLER SURFACE

Abstract. *This article examines the pressing issue of icing on unmanned aerial systems (UAS), which has a significant impact on the performance and safety of flight missions. It is noted that traditional anti-icing methods used in civil aviation (chemical, air-thermal, and mechanical) in most cases cannot be directly applied to UAS due to design limitations, the lack of heat sources, and limited weight and size parameters. A shift from actively combating existing ice to preventive ice formation is proposed as the most promising approach. The feasibility of modifying the propeller surface roughness and reducing the coefficient of adhesion to moisture through combined mechanical and chemical treatment, including the use of hydrophobic compounds, liquid glass, and ceramic coatings, is substantiated. It is concluded that integrating mechanical smoothing and chemical polishing methods followed by the application of protective coatings allows for maximum effectiveness in preventing UAS icing.*

Keywords: *unmanned aircraft systems (UAS), icing, anti-icing systems (AIS), aerodynamic surfaces, surface roughness, hydrophobization, ceramic coatings, liquid glass, flight safety.*

Беспилотные авиационные системы (БАС) прочно вошли в современную жизнь, находя применение как в гражданских, так и в военных сферах. Расширение спектра решаемых задач при выполнении работ БАС охватывают широкий спектр не только поставленных перед ним задач, а также развитую географию использования, что подразумевает эксплуатацию от пустынных регионов до условий Крайнего Севера. При этом операторы сталкиваются с целым рядом практических проблем, одной из наиболее сложных и опасных является обледенение аэродинамических поверхностей БАС.

Процесс обледенения для летательных аппаратов (ЛА) в целом носит универсальный характер. В пилотируемой авиации выработаны эффективные методы борьбы с ним: концепция «чистого крыла», применение противообледенительных жидкостей на земле, а также бортовые противообледенительные системы (ПОС) различных типов [1, 2]. Однако прямое перенесение этих решений на БАС часто невозможно из-за отсутствия необходимых ресурсов — массы, энергии, свободного пространства для размещения оборудования.

В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных подходов, адаптированных к специфике БАС. Настоящая статья посвящена обоснованию пассивного метода предотвращения обледенения, основанного на управлении свойствами поверхности винтов — одного из наиболее уязвимых элементов конструкции.

Процесс обледенения аэродинамических поверхностей летательного аппарата (далее ЛА) и БАС идентичный. Рассматривая методы борьбы с обледенением в гражданской авиации, можно сказать об основных правилах, а именно: *концепция чистого крыла*, недопущение выполнения полетного задания с отложениями снега и льда на аэродинамических поверхности ЛА и *применение противообледенительных составов* при предпосылках к появлению наледи и льда на аэродинамических поверхностях ЛА. Данные меры позволяют снизить шанс обледенения аэродинамических поверхностей

ЛА, тем самым повысить уровень безопасности полетов. Помимо методов недопущения, также существуют методы борьбы со льдом и наледью на аэродинамических поверхностях ЛА. Большая часть ЛА оснащена противообледенительными системами (далее ПОС) для борьбы с отложениями льда во время полета, где эффект противообледенительной обработки недостижим.

В гражданской авиации применяются следующие основные типы ПОС [2, 3]:

- Химические — распыление жидкостей, понижающих температуру замерзания воды. Для БАС реализация такой системы сопряжена с необходимостью установки бака, насосов, форсунок и трубопроводов, что ведёт к значительному увеличению массы и снижению полезной нагрузки.
- Воздушно-тепловые — используют отбор горячего воздуха от компрессора. На большинстве БАС (особенно электрических) источник тепла такой мощности отсутствует.
- Механические — деформация поверхности (например, пневмоимпульсные системы). Конструктивно сложны, требуют дополнительных приводов и места для их размещения.
- Электрические — нагрев поверхности резистивными элементами. Технически реализуемы, но влекут за собой увеличение энергопотребления, что сокращает продолжительность полёта, и требуют встраивания нагревателей в лопасти.

В зависимости от технических требований к конкретной модели ЛА аппарата производитель применяет соответствующий тип или комбинацию типов ПОС. Данные решения отлично подходят для ЛА где есть место и ресурсы для установки и работы данной системы.

Таким образом, активные методы борьбы с обледенением либо труднореализуемы на БАС, либо связаны с существенными конструктивными доработками и ухудшением эксплуатационных характеристик. Это подводит к мысли о целесообразности использования пассивных методов, направленных на предотвращение образования льда, а не на борьбу с уже возникшим.

Так как процесс обледенения негативно сказывается на летно-технических характеристиках (далее ЛТХ) и на прямую влияет на безопасность полетов. То необходимо принимать меры по недопущению обледенения и повышать уровень безопасности полетов БАС. В качестве примера БАС FPV дрон продемонстрированный на рисунке 1, можно отметить следующие, что обледенению будут подвергаться винты FPV дрона.



Рисунок 1 – Модель FPV дрона.

Рассматривая варианты ПОС применяемых в гражданской авиации, мы имеем следующие результаты:

- Химическая ПОС – не представляется возможным без потерь ЛТХ установить на БАС бачок, насос, форсунки и трубопроводы для распыления противообледенительной жидкости на аэродинамическую поверхность.
- Воздушно-тепловая ПОС – отсутствует источник отбора теплого воздуха для борьбы с обледенением.
- Механическая ПОС – не представляется возможным деформировать во время выполнения полета аэродинамическую поверхность для борьбы с обледенением.

- Электрическая ПОС – есть источник электрического поля, возможно проектирование лопастей со встроенными нагревательными элементами

Начиная исследования в данной области, наблюдаем что если бороться со льдом на аэродинамических поверхностях не представляется возможным, то стоит попробовать пойти путем недопущения образования наледи на аэродинамической поверхности БАС.

Образование льда на поверхности в условиях переохлаждённой влаги определяется двумя основными факторами: наличием центров кристаллизации и адгезией между поверхностью и водой. Шероховатость поверхности создаёт множество микронеровностей, которые удерживают капли влаги даже при действии центробежных сил, способствуя их накоплению и последующему замерзанию.

Снижение шероховатости облегчает удаление влаги с поверхности за счёт центробежной силы, однако, как показывают исследования [4, 5], ключевую роль играет не только рельеф, но и смачиваемость. Поверхности с высоким краевым углом смачивания (гидрофобные) способствуют тому, что вода принимает форму, близкую к сферической, уменьшая площадь контакта и, соответственно, адгезию льда.

Следовательно, для достижения максимального эффекта необходимо комплексное воздействие на поверхность, включающее:

- сглаживание макро- и микронеровностей;
- придание поверхности гидрофобных свойств с помощью специальных покрытий.

Одним из способов недопущения льда на винте может стать изменение коэффициента сцепления поверхности льда со влагой из атмосферы.

Любая поверхность под увеличением представляет собой шероховатую поверхность, представленную на рисунке 2.

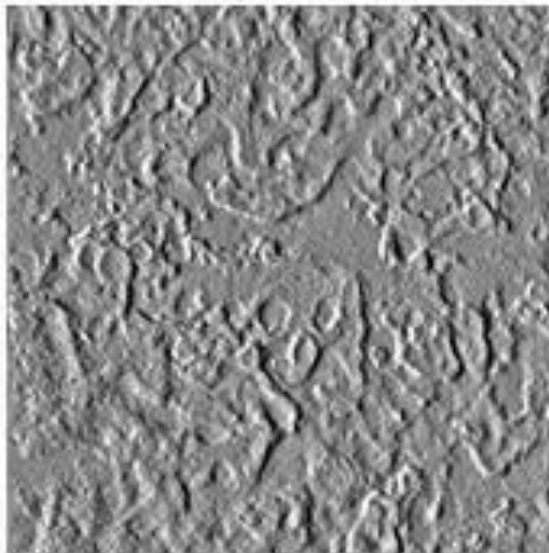


Рисунок 2 – поверхность материала винта при 1000х увеличении.

Данные шероховатости затормаживают процесс само удаления жидкости с винта за счет центробежной силы. Таким образом одним из предлагаемых решений по недопущению образованию льда на поверхности винта может стать изменение его шероховатости. Есть несколько основных способов изменения шероховатости поверхности, а именно: *механический* и *химический*.

Механический способ изменения шероховатости поверхности представляет собой процесс сглаживания вершук неровностей, к примеру применение полировальных паст мелкой абразивности позволит понизить коэффициент сцепления поверхности и жидкости, но существует и минус данного способа, так как происходит процесс мелкой шлифовки поверхности, без заполнения оставшихся шероховатостей поверхности, что для данных требований не дает максимальной эффективности.

Рассматривая химический способ устранения шероховатостей поверхностей, можно выделить несколько возможных комбинаций

применения химических составов, отдельно для металлических и полимерных составов. При детальном изучении технологий химического воздействия на поверхность при полировке выделяют два основных метода: глянецвание, которое придает блеск поверхности и выравнивает субнеровности при толщине снимаемого слоя менее 1 мкм, и полирование, которое сглаживает неровности при толщине снимаемого слоя от 1 до 10 мкм. При уменьшении шероховатости поверхности после процедуры химической полировки остается почти неизменным коэффициент сцепления поверхности, в отдельных случаях возможно его повышение. Для понижения коэффициента сцепления и более длительного сохранения чистоты поверхности по сравнению с чистым материалом, возможно применение гидрофобизирующих составов. Возможно применение составов жидкого стекла, так как отвердевшие материал практически не пропускает влагу, имеет хорошую адгезию к различным поверхностям, за исключением полимерных материалов, ввиду отсутствия растворителей и (или) размягчителей, способствующих лучшему проникновению состава в поверхность полимера, тем самым данный вариант является хорошим по своим свойствам понижения коэффициента сцепления молекул воды с обрабатываемой поверхностью, но имеет недостаток в виде отслоения состава при повреждении его пленки. В настоящее время возможно применение керамических покрытий, в основу которых входит жидкое стекло, при сохранении положительных качеств базового состава добавляется увеличение прочности состава, глубины проникновения в поверхностные слои материала за счет введения в состав органического растворителя кремния. Дополнительное введение ПАВов и оксидов алюминия позволяет сильнее понизить коэффициент сцепления молекул воды с обработанной поверхностью. Для достижения наилучшего эффекта рекомендуется пройти все этапы обработки поверхности, начиная с механической, химической и заканчивая нанесением защитного состава.

Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ:

- отсутствие влияния на массу и энергопотребление БАС в полёте;

- пассивность — не требует вмешательства оператора или автоматики;
- возможность применения на существующих типах БАС без изменения конструкции;
- сочетание с другими методами (например, электрическим обогревом) при необходимости повышения надёжности.

Вместе с тем необходимо учитывать возможные ограничения:

- чувствительность покрытия к механическим повреждениям (требуется аккуратное обращение и периодическое восстановление);
- снижение эффективности при интенсивном загрязнении поверхности;
- необходимость подбора составов для различных материалов (особенно для полимеров, где адгезия покрытий может быть недостаточной);
- ограниченный ресурс покрытия в реальных условиях эксплуатации (требует проведения ресурсных испытаний).

Указанные ограничения не носят принципиально непреодолимого характера и могут быть сняты путём оптимизации технологии нанесения и периодического технического обслуживания.

В результате проведённого анализа установлено, что проблема обледенения аэродинамических поверхностей БАС требует поиска альтернативных решений, отличных от классических противообледенительных систем, применяемых в пилотируемой авиации. Ограниченность энергетических и массогабаритных ресурсов БАС делает невозможным использование воздушно-тепловых, химических и механических ПОС в их традиционном исполнении, тогда как электрические системы являются наиболее реализуемыми, но требуют доработки конструкции.

Показано, что одним из эффективных направлений является предотвращение образования льда за счёт снижения коэффициента сцепления влаги с поверхностью винтов. Для этого целесообразно применение комплексной обработки, включающей:

- механическое полирование для устранения макронеровностей;

- химическое полирование (глянцевание) для сглаживания микронеровностей;
- нанесение гидрофобизирующих составов, в том числе на основе жидкого стекла и керамических покрытий с добавлением поверхностно-активных веществ и оксидов алюминия.

Предложенный подход позволяет существенно снизить адгезию влаги к поверхности, уменьшить риск обледенения и повысить безопасность эксплуатации БАС в сложных метеорологических условиях.[6] Наибольшая эффективность достигается при последовательном применении всех этапов обработки, что подтверждает необходимость разработки единой технологической схемы подготовки аэродинамических поверхностей для БАС.

Литература:

1. Авиационные правила АП-25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории. — М.: Авиаиздат, 2019.
2. Федеральные авиационные правила (ФАП) «Подготовка и выполнение полётов в гражданской авиации Российской Федерации». — М., 2020.
3. Бочаров, А.Н. Методы снижения обледенения авиационных конструкций на основе управления смачиваемостью поверхности / А.Н. Бочаров, С.В. Иванов // Авиакосмическое приборостроение. — 2022. — № 5. — С. 42–49.
4. Kulinich, S.A. Ice adhesion on superhydrophobic surfaces / S.A. Kulinich, S. Farzaneh // Applied Surface Science. — 2009. — Vol. 255, Iss. 16. — P. 7318–7321.
5. Antonini, C. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems / C. Antonini, M. Innocenti, T. Horn // Cold Regions Science and Technology. — 2011. — Vol. 67, Iss. 1–2. — P. 58–67.
6. Доценко, В. А. К вопросу поддержания лётной годности воздушного судна в условиях ограниченной инфраструктуры (проблемы и предложения) / В. А. Доценко // Актуальные аспекты развития гражданской авиации (Авиатранс-

2025): Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–21 июня 2025 года. – Ростов-на-Дону: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2025. – С. 535-539. – EDN KGSWRR.