

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-143-160

АДГЕЗИЯ ЛЬДА. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (обзор)

С.А. Марченко¹, В.Г. Железняк¹, В.А. Кузнецова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. В настоящее время для определения степени защиты от обледенения при использовании противообледенительных покрытий применяют экспериментальные стенды и лабораторные установки, на которых в большинстве случаев проводят два типа испытаний: прямое механическое и центробежной силой. Разнообразие методов, установок и других различных факторов затрудняет сравнение устанавливаемых данных и требуемых характеристик противообледенительных свойств покрытий. Проведен анализ методов и установок, используемых для определения адгезии льда, а также факторов, которые могут повлиять на результаты испытаний.

Ключевые слова: адгезия льда, обледенение самолетов, адгезионная прочность при сдвиге, метод центробежной силы, адгезионная прочность при растяжении, капли переохлажденной воды

Для цитирования: Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Адгезия льда. Методы определения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-143-160.

Scientific article

ICE ADHESION. METHODS OF DETERMINATION (review)

S.A. Marchenko¹, V.G. Zheleznyak¹, V.A. Kuznetsova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Currently, to determine the degree of de-icing protection when using anti-icing coatings, experimental benches and laboratory installations are used, in which in most cases two types of tests are performed: direct mechanical and centrifugal force. The variety of methods, facilities, and other various factors makes it difficult to compare the established data and the required characteristics of anti-icing properties of coatings. An analysis of the methods and installations used to determine ice adhesion, as well as the factors that can affect the test results, has been conducted.

Keywords: ice adhesion, aircraft icing, shear adhesion strength, centrifugal force method, tensile adhesion strength, supercooled water droplets

For citation: Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Ice adhesion. Methods of determination (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-143-160.

Введение

Погодные условия при отрицательных температурах являются критическими факторами при проектировании, анализе и эксплуатационных испытаниях самолетов [1–3]. Одним из таких факторов, представляющих серьезную опасность, является обледенение [4–7]. Наличие льда на поверхностях изменяет направление воздушного потока над крылом и оперением, а также уменьшает подъемную силу, удерживающую самолет в воздухе, что может вызывать аэродинамический срыв – состояние, приводящее к временной потере управления воздушным судном [8, 9]. Обледенение воздухозаборника также может изменить аэродинамические характеристики, снизить мощность/тягу двигателя и повлиять на его работу [10, 11]. Скопление льда на поверхности вращающегося кока оказывает существенное влияние на однородность поля входного потока, что приводит к отрыву воздушного потока и даже помпажу компрессора. Осыпание льда происходит легче из-за эффекта вращения. Попадая в двигатель, отколовшийся лед может удариться о лопасти с высокой скоростью вращения, что приводит к их серьезным механическим повреждениям [12]. Несущие винты вертолетов более подвержены обледенению в отличие от воздушных судов с неподвижным крылом, так как сталкиваются с большим количеством частиц переохлажденной воды, чем остальная часть фюзеляжа. Обледенение может быть критически опасным, поскольку способствует созданию чрезмерной вибрации и увеличению действия центробежной нагрузки [13].

Традиционные подходы к предотвращению обледенения включают различные типы противообледенительных систем: электротепловой (заложенные под обшивкой летательного аппарата электронагревательные элементы), воздушно-тепловой (обогрев конструкций летательного аппарата за счет горячего воздуха, отобранного от двигателей), использование механических средств (например, накачанные ботинки на передних кромках самолета) и распыляемых охлаждающих жидкостей. Однако данные методы имеют существенные недостатки, поскольку их применение приводит к увеличению массы и расходу топлива воздушного судна, загрязнению окружающей среды, а также они достаточно дорогостоящие [14–16]. В настоящее время все больше внимания уделяется противообледенительным покрытиям, низкая смачиваемость поверхности которых способствует удалению налетающих капель, задержке замерзания и уменьшению сцепления льда с подложкой [17–23].

Одним из основных критериев оценки противообледенительных свойств разрабатываемых материалов является адгезия льда. Проблема заключается в том, что единый стандарт для определения сцепления материала со льдом отсутствует. В результате существует множество методов определения адгезии льда, кроме того, трудно определить точную прочность сцепления материала со льдом, хотя общее мнение заключается в том, что более низкие значения силы указывают на лучшие противообледенительные свойства материала [24–26].

В данной работе проведен анализ некоторых из наиболее применяемых методов испытаний, которые могут служить стандартом для определения прочности сцепления со льдом при испытаниях новых противообледенительных материалов.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Журчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Обледенение воздушного судна

На обледенение воздушного судна влияет множество факторов, в том числе режим полета, геометрические размеры зоны обледенения, атмосферные условия и продолжительность прохождения через обледеневающие облака [27]. Чем выше скорость полета, тем больше капель воды будет воздействовать на поверхность самолета и, следовательно, тем больше будет обледенение. Однако более высокая скорость полета приводит к большему аэродинамическому нагреву, который вызывает повышение температуры вблизи критической точки передней кромки крыла, что влияет на тип и форму образующегося льда или его полное растаивание за счет аэродинамического тепла.

Концентрация и распределение капель переохлажденной воды и кристаллов льда внутри облака меняются в зависимости от температуры и высоты над уровнем моря. По мере снижения температуры уменьшается и количество водяного пара, которое может содержаться в воздухе, что приводит к снижению вероятности обледенения [28]. По форме авиационный лед можно условно разделить на следующие виды: изморозь, глазурь, торосистый и смешанный лед [29]. Изморозь образуется в атмосферных условиях низкой температуры замерзания – как правило, менее $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, характеризуется относительно низким содержанием жидкой воды и малым средним объемным диаметром капель. Благодаря мгновенному замерзанию изморозь рыхло сцементирована и легко отваливается, ее поверхность сохраняет аэродинамическую форму и менее опасна для полетов самолетов [30]. Глазурь в основном возникает при относительно высокой температуре окружающей среды, обычно в диапазоне от -10 до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, из-за наличия в облаках замерзших микрокапель и переохлажденной жидкости. В этом случае переохлажденные капли не замерзают или замерзают частично после удара о поверхность. Некоторые капли (обычно размером $>50\text{ мкм}$) замерзают при контакте, затем высвобождение их скрытой теплоты плавит капли обратно в жидкость, они стекают по детали воздушного судна и замораживаются повторно [31–33]. Частицы размером 20 мкм представляют наименьшую размерную группу, которая может достичь поверхности из-за наличия инерции [34]. Структура глазури относительно компактная, с более высокой плотностью, прозрачная и с трудом отпадает. В процессе обледенения на передней кромке крыла может образовываться роговой лед, оказывающий большое влияние на аэродинамические характеристики. Смешанный лед представляет собой смесь изморози и глазури, которая обладает характеристиками обоих типов льда. Подобно глазури смешанный лед также может значительно снизить аэродинамические характеристики и создать угрозу безопасности полета [35]. Образование торосистого льда, как правило, вызывают переохлажденные крупные капли, диаметр которых превышает 100 мкм . Они имеют большую инерцию и способны сталкиваться с поверхностью самолета далеко за пределами систем защиты от обледенения. В частности, процесс соударения часто сопровождается разбрызгиванием и образованием большого количества капель [36, 37].

В последнее время проведено много исследований и разработано множество экспериментальных моделей, связанных с замерзанием капли и ее ударом о поверхность, показано значение шероховатости в процессе обледенения.

В работах [38–48] исследовали замерзание капли. Температура зародышеобразования находится в широком интервале и снижается с уменьшением объема капель. Продолжительность замерзания и диаметр растекания капли существенно зависят от смачиваемости и температуры поверхности, а также от температуры капли перед рекалесценцией, которая определяет начальную фракцию льда для стадии замерзания. В процессе замерзания увеличивается объем капли и

происходит резкое возрастание ее высоты на этапе рекалесценции. Со временем скорость увеличения объема снижается, в то время как скорость увеличения высоты возрастает. При длительном контакте с покрытием вода неизбежно будет проникать в него, что приведет к снижению его барьерного действия, а чем ниже температура, тем больше значение адгезионной прочности льда. Образование льда на поверхности влечет за собой образование сил водородной связи, а также ван-дер-ваальсовых и электростатических сил с поверхностью. Плавление замерзшей капли происходит при почти фиксированной температуре, и степень перегрева, необходимая для запуска процесса плавления, небольшая, однако чем крупнее капля, тем дольше она плавится. Скорость таяния льда возрастает с увеличением пористости, которая влияет на его теплоемкость.

В работах [49–51] анализ экспериментальных данных и теоретических моделей показал, что гладкая поверхность с малой шероховатостью имеет большую задержку замерзания, чем супергидрофобные покрытия с иерархическими структурами.

Разработано множество моделей обледенения воздушного судна: двумерная полуэмпирическая модель разбрызгивания для прогнозирования удара крупной капли о криволинейные поверхности [52], модели обледенения самолета с учетом изморози [53, 54], модели динамики удара-замерзания переохлажденной капли воды о холодную поверхность [55, 56] и др.

Методы испытания адгезии льда

Испытания по определению адгезии льда можно разделить на две основные категории: прямое механическое испытание (с помощью метода горизонтального и вертикального сдвига [57–60], а также метода растяжения [61, 62]) и испытание центробежной силой [63–65]. В первом случае сила прикладывается непосредственно ко льду, во втором – центробежная сила отрывает лед от материала. Существует также два способа нанесения льда на подложку: статический или ударный. Статический лед образуется путем заливки воды в форму и ее замораживания с определенными геометрическими размерами. Ударный лед создают с помощью аэродинамических труб (рис. 1) [66, 67] или холодильных камер, в которых создается ледяное облако (рис. 2) [68]. Поскольку испытания с ударным льдом применяются для оценки обледенения летательных аппаратов, они включают более сложные факторы: температуру проведения испытания, средний объемный диаметр капель, содержание жидкой воды, продолжительность обледенения, температуру и чистоту воды и т. д. [69].

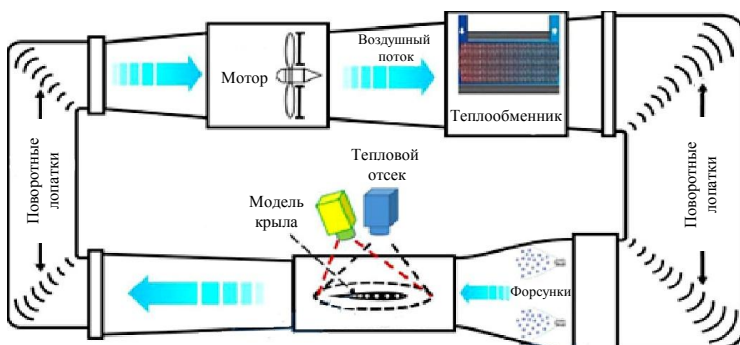


Рис. 1. Схема аэродинамической трубы для создания ударного льда



Рис. 2. Фото форсунок, расположенных в потолке холодильной камеры для создания ледяного облака

Методы горизонтального и вертикального сдвига. Данные методы широко используются для измерения сцепления со льдом, поскольку они более доступные. Подложку с покрытием помещают в морозильную камеру или на холодную пластину. После образования льда к испытательной колонне прикладывают возрастающую силу, которая может быть толкающей или тянущей. Для определения значения адгезии льда делят максимальное регистрируемое силомером усилие, приходящееся на момент отрыва льда от поверхности, на площадь поперечного сечения границы раздела «лед-подложка» [57]. На рис. 3 показана схема установки для определения адгезии льда с помощью горизонтального сдвига [70].

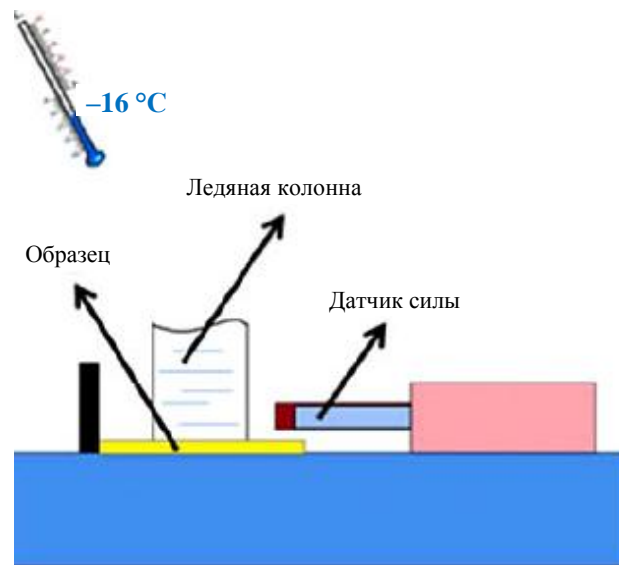


Рис. 3. Установка для определения адгезии льда методом горизонтального сдвига

В работе [71] определяли адгезию льда с помощью вертикального сдвига. Установка состояла из испытательной машины Zwick с верхним приспособлением, адаптированным к раме, и шестью тефлоновыми квадратами. Формы на измеряемой поверхности заливают водой и затем помещают на ячейки Пельтье, которые снижают температуру до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. После замерзания воды поверхность помещали в испытательную машину вертикально (рис. 4), толкая кюветы, лежащие теперь горизонтально.

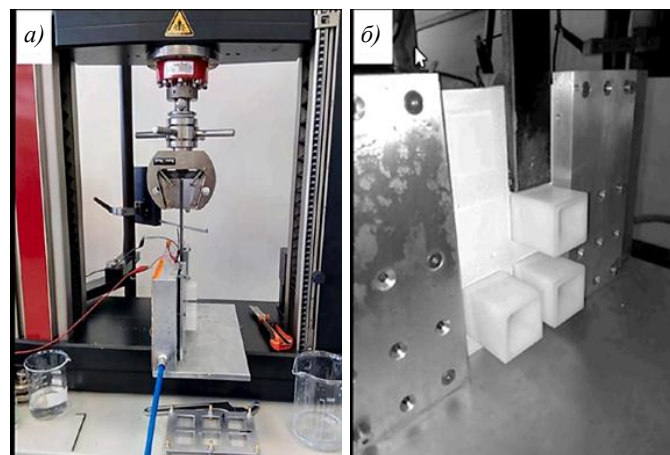


Рис. 4. Устройство для определения адгезии льда методом вертикального сдвига: а – общий вид испытательной установки; б – деталь вала оснастки, воздействующая на кювету

В работе [72] для измерения адгезии льда с помощью вертикального сдвига вместо кюветы использовали батистовую ленту, которую примораживали к покрытию. Затем закрепляли в зажимах разрывной машины образец с покрытием и свободный (несмоchenный) конец ленты. Значение адгезии льда определяли по регистрируемой максимальной приложенной силе в момент отрыва ленты от покрытия, нормированной на площадь контакта ленты с покрытием.

Для определения адгезии льда методом горизонтального сдвига также используют специальные стенды (рис. 5). Так, в статье [50] представлена работа испытательного стенда, помещенного в аэродинамическую трубу, где происходит обледенение с помощью ударного льда. Параметры испытаний следующие: температура $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, размер частиц 20 мкм, скорость удара частиц 50 м/с. Испытательное устройство включало подложку, плунжер, резиновую трубку и опорную конструкцию. После образования слоя льда толщиной, достаточной для обеспечения удовлетворительного распределения напряжений для испытания, к плунжеру прикладывали силу и в момент начала его движения (определяли по размыканию электрической цепи) фиксировали ее (рис. 6). Наличие защитных экранов предотвратило образование льда между подвижной и неподвижной частями стенда.



Рис. 5. Испытательный стенд для определения адгезии льда методом горизонтального сдвига

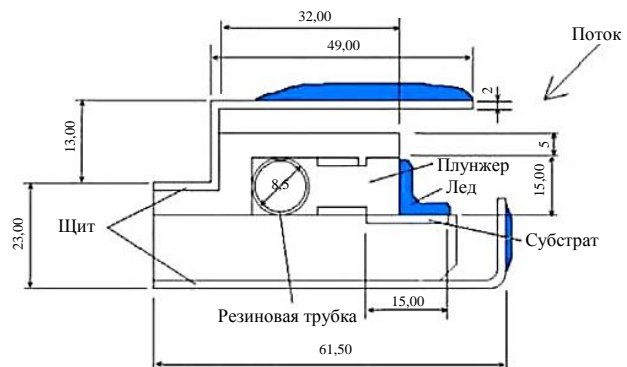


Рис. 6. Схема испытания методом горизонтального сдвига

Метод растяжения. Другим методом измерения адгезии льда является метод растягивающей силы. Установка, используемая при применении данного метода, включает стакан и концентрический цилиндр, между которыми существует зазор. Цилиндр покрыт ледофобным покрытием, а внутренняя поверхность стакана обладает высокой прочностью сцепления со льдом (может быть и наоборот). Зазор между стаканом и цилиндром заполняется водой, которая охлаждается до замерзания. После образования льда к внутреннему цилиндру с помощью разрывной машины прикладывают тяговое усилие. В момент отрыва фиксируют усилие и путем деления этого усилия на площадь границы раздела «лед–ледофобное покрытие» получают значение прочности сцепления льда с материалом [73].

В работе [74] представлено высокопроизводительное устройство, предназначенное для измерения прочности сцепления различных поверхностей со льдом при растяжении. Его преимущество состоит в том, что геометрический размер и форма его держателей оптимизированы для достижения равномерного распределения напряжения на границе раздела между подложкой и льдом. Цикл замораживания и измерение растяжения происходят на одном и том же этапе. Это означает, что образец льда/субстрата

не нужно переносить на этап измерения. Аппарат допускает три степени свободы в направлениях x , y и z (рис. 7).

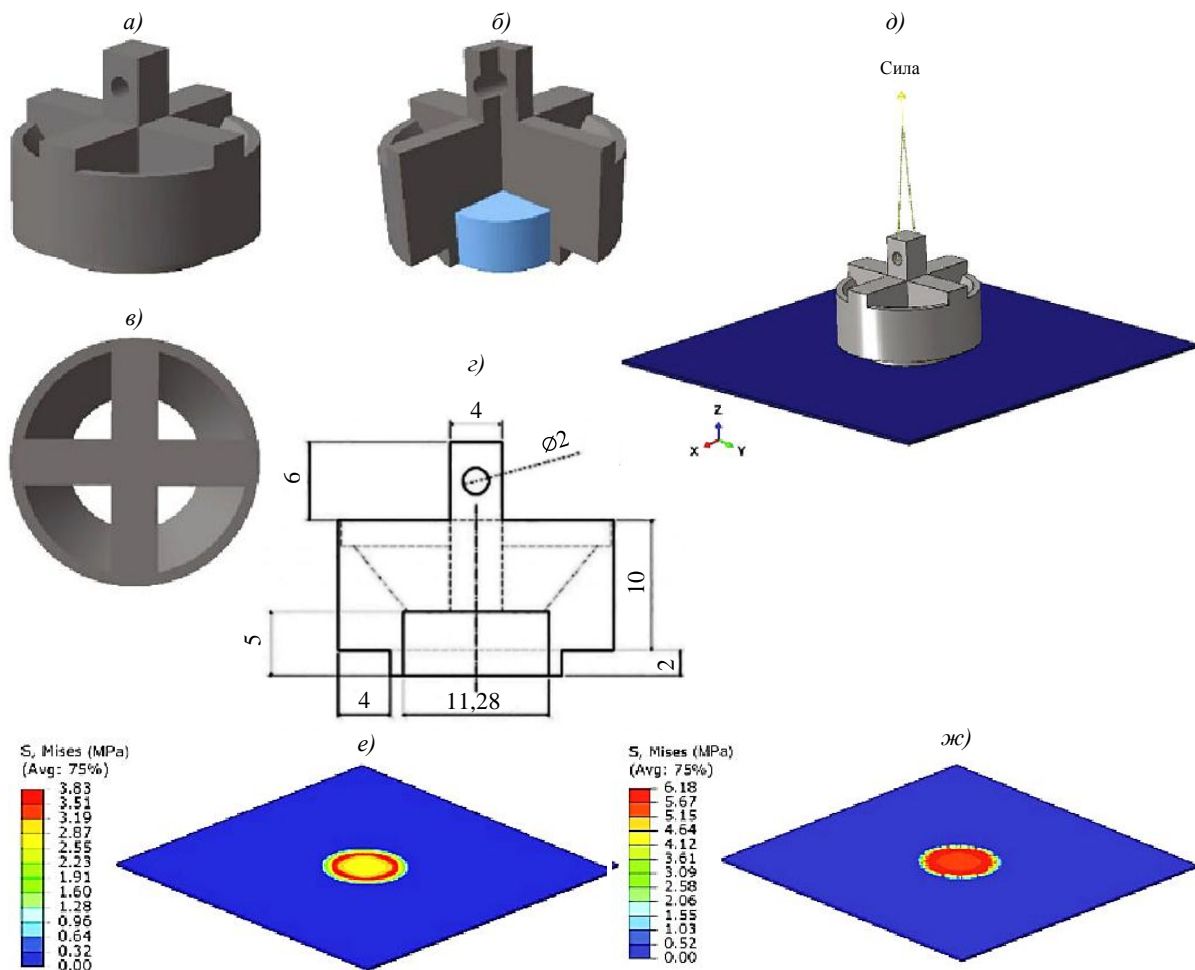


Рис. 7. Ледодержатель, входящий в состав установки по определению адгезии при растяжении: *a* – изометрический вид спроектированного держателя льда; *б* – разрез четверти модели, где показан цилиндрический лед внутри держателя; *в* – двумерный вид держателя льда сверху; *г* – чертеж разработанного держателя льда (вид спереди, размеры указаны в мм); *д* – сборочная модель для испытания на сцепление со льдом; *е, ж* – распределение напряжений в начальной и конечной точках воздействия (до разделения)

Метод центробежной силы. Как правило, испытания с вращением дают более низкие показатели, чем «статические», однако являются лучшим методом для проверки того, как лед прилипает к вращающимся деталям. При использовании данного метода лед наносят на конец вращающейся балки или ротора путем помещения воды в форму (кювету) или посредством ударного льда. При вращении балки создается поперечная сила на границе между льдом и покрытием и по мере повышения скорости вращения индуцированная сила сдвига увеличивается до тех пор, пока лед не оторвется от покрытия. Прочность сцепления со льдом определяется следующим образом: значение центробежной силы делят на значение площади поперечного сечения отколовшегося льда в момент отрыва от покрытия (фиксируется датчиками) [24].

В работе [75] представлена установка, позволяющая работать при большом количестве проб. Центробежное устройство (рис. 8) расположено внутри рабочего простран-

ства климатической установки Binder. По периметру вращающегося диска фиксировали образцы с покрытием, на них помещали по две полипропиленовые втулки, которые использовали для приготовления цилиндров льда на образце. Расстояние от центра диска можно варьировать, что обеспечивает точность испытания. С помощью видеокамеры определяли момент отрыва каждой ледяной пластинки с поверхности образца. Адгезию льда рассчитывали делением значения центробежной силы, действующей на втулку в момент отрыва, на значение площади контакта между льдом и образцом.

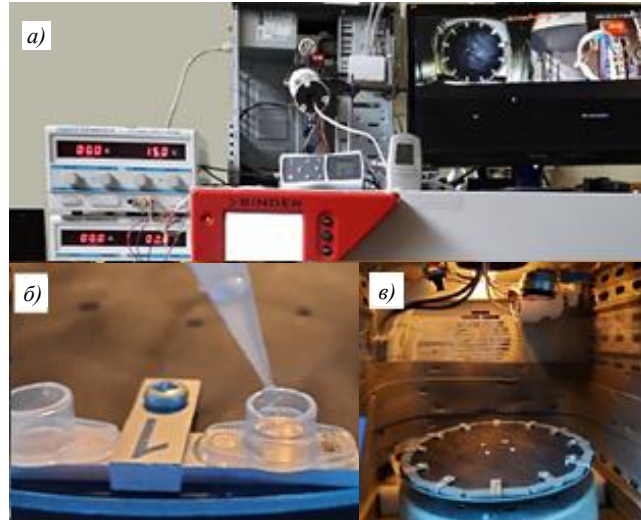


Рис. 8. Центробежная установка для определения адгезии льда методом центробежной силы: *a* – общий вид; *б* – заполнение втулки водой; *в* – вид на рабочее пространство климатической камеры

В работе [76] определяли адгезию льда к покрытию методом центробежной силы на установке, показанной на рис. 9 и 10, являющейся частью лабораторных систем исследования и тестирования неблагоприятных условий окружающей среды в университете Пенсильвании. Условия проведения испытания следующие: средний объемный диаметр частиц 20 мкм, содержание жидкой воды $0,9 \text{ г/м}^3$, скорость удара частиц 60 м/с, температура варьировалась в пределах от -8 до $-16 \text{ }^\circ\text{C}$.

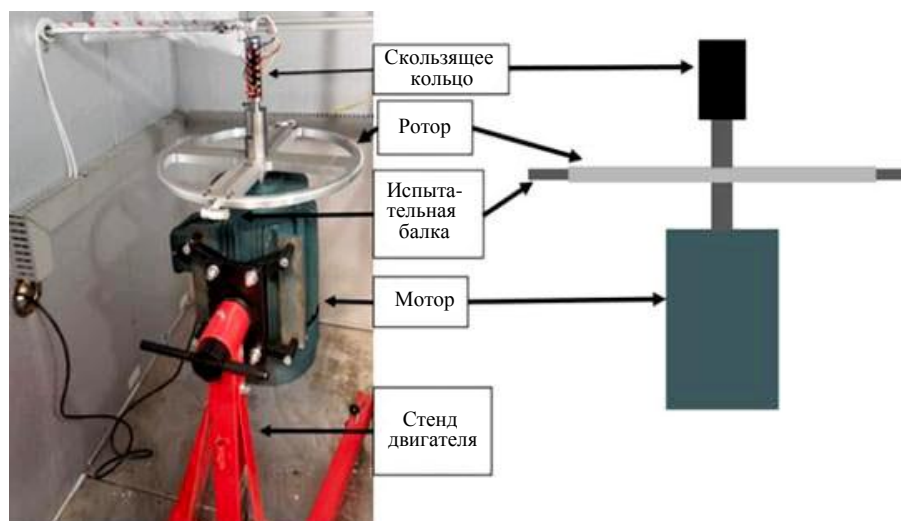


Рис. 9. Центробежная установка для определения адгезии льда методом центробежной силы в лаборатории университета в Пенсильвании

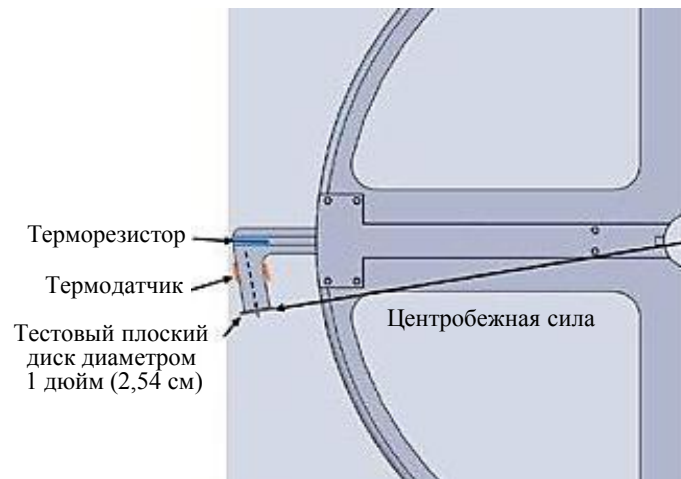


Рис. 10. Расположение балки, датчиков, осевой линии изгиба и направление центробежной силы

На специальной балке располагают образец. По мере того как во время вращения лед нарастает на образец, центробежная сила на балке увеличивается и балка изгибается в поперечном направлении. Тензорезисторы измеряют изменение напряжения из-за дополнительного отклонения, вызванного обледенением. В результате образуется достаточно большое количество льда, который под действием центробежной нагрузки отрывается от испытательного образца. Срыв льда фиксируется резким увеличением напряжения, измеренного тензодатчиками.

Проблемы существующих методов для определения адгезии льда

1. Результаты испытаний материала подложки при использовании различных методов тестирования могут демонстрировать совершенно разные значения прочности адгезии льда. Например, при испытании поверхности алюминиевого сплава при температуре $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием методов на растяжение и сдвиг значения адгезии льда составили 1,54 и 1,21 МПа соответственно [77].

2. Испытания по определению адгезии льда с использованием одного и того же метода, но при различных экспериментальных условиях и вариантах подготовки образцов могут привести к различным результатам. Например, различная скорость замерзания воды приводит к разной плотности льда [78].

3. Одной из важных проблем несходности результатов разных исследовательских групп является форма, используемая для фиксации и изготовления статических образцов льда, которые различаются геометрическими размерами, материалом и положением для размещения льда. Кроме того, большинство из них не могли быть удалены перед тестированием, поскольку изготовлены из жесткого материала. В результате может возникнуть отрыв корпуса формы от поверхности из-за расширения льда при его кристаллизации и образоваться зазор между нижним краем формы и поверхностью испытываемого материала, вследствие чего приложенная сила будет воздействовать не только на лед, но и на форму [79].

Материал формы также значительно влияет на качество льда и скорость его расширения из-за тепловых эффектов формы. Различия в скорости охлаждения воды при ее кристаллизации вследствие различий в скоростях теплопередачи разнородных материалов могут привести к образованию льда с различной хрупкостью.

4. Важным фактором является толщина испытываемого материала, особенно для нежестких материалов, подвергаемых испытанию методом горизонтального сдвига.

С увеличением толщины могут возникать силы отслаивания, из-за чего адгезия льда уменьшается [79].

5. При испытании методом горизонтального сдвига положение силового зонда также может влиять на конечные значения адгезии льда, поскольку вертикальные смещения увеличиваются с возрастанием высоты зонда от поверхности подложки. В результате слишком удаленный (по вертикали) от поверхности силовой зонд может создавать большой крутящий момент, который будет вращать лед, а не производить чистый сдвиг [79].

6. При испытаниях на растяжение часто происходит разрушение самого льда, а не разрушение на границе «лед–металл».

7. При испытаниях на вращающихся испытательных стендах присутствуют такие факторы, как вибрации, аэродинамические силы и локальный нагрев, которые не учитываются в «статических» испытаниях. Считается, что эти силы способствуют зарождению и распространению трещин и, следовательно, приводят к меньшей кажущейся силе, необходимой для отрыва льда. Определить режим разрушения может быть трудно из-за скорости испытания и воздействия ветра.

Заключения

При испытаниях на определение адгезии льда учитывают множество факторов, влияющих на результат: метод, испытательная установка, внешняя среда, испытываемый материал, скорость замерзания и сам лед, а также форма, в которой он образуется.

Анализ научно-технической литературы показал, что для определения адгезии льда в лабораторных условиях часто используют стандартное испытание на сдвиг (которое не требует сложной установки и обеспечивает возможность испытывать много образцов) для минимизации количества экспериментальных ошибок, которые значительно влияют на стандартное отклонение. При этом нужно учесть следующее:

- замораживание и испытания по определению адгезии льда следует проводить в морозильной камере, без переноса образцов к установке во избежание таяния льда;
- испытания необходимо проводить при одинаковой температуре;
- следует избегать быстрого замораживания льда;
- форма должна обладать низкой теплопроводностью и легко извлекаться с минимальным воздействием на лед;
- толщина испытываемой поверхности должна быть такой, чтобы избежать появления силы отслаивания, и для всех испытываемых образцов одинаковой;
- использовать дистиллированную воду для уменьшения влияния загрязняющих веществ, которые могут повлиять на кристаллизацию льда;
- силовой зонд должен быть расположен как можно ближе к нижней части льда.

Список источников

1. Venkataramani K., McVey L., Holm R., Montgomery K. Inclement weather considerations for aircraft engines // 45th Aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, Nevada, 2007. P. 695.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 23–47.
3. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

4. Ignatyev D.I., Khrabrov A.N., Kortukova A.I. et al. Interplay of unsteady aerodynamics and flight dynamics of transport aircraft in icing conditions // *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 104. P. 105914.
5. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V. et al. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications // *Progress in Aerospace Sciences*. 2019. Vol. 105. P. 74–97.
6. Cebeci T., Kafyeke F. Aircrafticing // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 35 (1). P. 11–21.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Lynch F.T., Khodadoust A. Effects of Ice Accretions on aircraft Aerodynamics // *Progress in Aerospace Sciences*. 2001. Vol. 37. P. 669–767.
9. Airworthiness directives. Boeing aircraft // *Federal Register*. 2016. Vol. 81. No. 78. P. 23581–23586.
10. Mason J., Strapp J., Chow P. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // 45th Aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, Nevada, 2006. P. 206.
11. Kamel M. Al-Khalil, Theo G. Keith, Kenneth J. De Witt. Icing calculations on a typical commercial jet engine inlet nacelle // *Journal of Aircraft*. 1997. Vol. 34. No. 1. P. 87.
12. Zheng M., Guo Z., Dong W., Guo X. Experimental investigation on ice accretion on a rotating aero-engine spinner with hydrophobic coating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 136. P. 404–414.
13. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L. Eliciting a human understandable model of ice adhesion strength for rotor blade leading edge materials from uncertain experimental data // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39. P. 10212–10225.
14. Flight in icing conditions: AC 91-74B – Pilot Guide / US Department of Transportation FAA, 2015. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/1028388 (дата обращения: 19.03.2022).
15. Zhang Z., Liu X. Control of ice nucleation: freezing and antifreeze strategies // *Chemical Society Reviews*. 2018. Vol. 47. P. 7116–39.
16. Li Q., Guo Z. Fundamentals of icing and common strategies for designing biomimetic anti-icing surfaces // *Journal of Materials Chemistry*. 2018. Vol. 6. P. 13549–13581.
17. Zheng H.K., Chang S.N., Zhao Y.Y. Anti-icing and icephobic mechanism and applications of superhydrophobic/ultra slippery surface // *Progress in Chemistry*. 2017. Vol. 29 (1). P. 102–118.
18. Тарасова П.Н., Слепцова С.А., Лаукканен С., Дьяконов А.А. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
19. Соловьянчик Л.В., Пыхтин А.А., Ведникова В.С., Кондрашов С.В., Павлюк Б.Ф. Исследование влияния наночастиц диоксида кремния на поверхностные свойства кремнийорганических покрытий // *Российские нанотехнологии*. 2019. Т. 14. С. 31–36.
20. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
21. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Материалы для освоения Арктики и холодных территорий // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 21.
22. Yang S., Xia Q., Zhu L. et al. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. P. 4956–4962.
23. Golovin K., Kobaku S.P.R., Lee D.H. et al. Designing durable icephobic surfaces // *Science Advances*. 2016. Vol. 2. P. 1–12.

24. Hakimian A., Nazifi S., Ghasemi H. Ice Adhesion: Mechanism, Measurement and Mitigation // *Metrology of Ice Adhesion*. Scrivener Publishing LLC, 2020, pp. 217–236. DOI: 10.1002/9781119640523.ch8.
25. Rönneberg S., He J., Zhang Z. The need for standards in low ice adhesion surface research: a critical review // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2019. Vol. 34 (3) P. 319–347.
26. Bleszynski M., Clark E. Current Ice Adhesion Testing Methods and the Need for a Standard: A Concise Review October // *Standards*. 2021. Vol. 1 (2). P. 117–133.
27. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 88–96.
28. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D. et al. Durable and scalable icephobic surfaces: similarity and distinctions from superhydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2016. Vol. 12. P. 1938–1963.
29. Fortin G., Laforte J., Ilinca A. Heat and mass transfer during ice accretion on aircraft wings with an improved roughness model // *International Journal of Thermal Sciences*. 2006. Vol. 45. P. 595–606.
30. Amendola A., Mingione G. On the problem of icing for modern civil aircraft // *Air & Space Europe*. 2001. Vol. 3 (3/4). P. 214–217.
31. Zhang C., Liu H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28. P. 062107.
32. Lian Y., Guo Y. Investigation of the splashing phenomenon of large droplets for aviation safety // *SAE Technical Paper*. 2015. P. 2015-01-2100.
33. Cao Y., Tan W., Wu Z. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety // *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 75. P. 353–385.
34. Isaac G.A., Cober S.G., Strapp J.W. et al. Recent Canadian research on aircraft in-flight icing // *National Research Council Canada*. 2001. Vol. 47. P. 213–221.
35. Zhu D., Zhao C., Liu H. New ice accretion model for aircraft icing based on phase-field method // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 5693.
36. Wang Y., Dandekar R., Bustos N. et al. Universal Rim Thickness in Unsteady Sheet Fragmentation // *Physical review letters*. 2018. Vol. 120. P. 204503.
37. Tropea C., Schremb M., Roisman I.V. Physics of SLD Impact and Solidification // *7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences*. Milan, 2017. P. 512.
38. Wang Y., Cheng Y. New perspectives on the droplet freezing nucleation and early crystal growth mechanisms // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 40. P. 1023–1028.
39. Sun M., Kong W., Wang F., Liu H. Impact freezing modes of supercooled droplets determined by both nucleation and icing evolution // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 142. P. 118431.
40. Xu Q., Li Z., Wang J., Wang R. Characteristics of single droplet impact on cold plate surfaces // *Drying Technology*. 2012. Vol. 30 (15). P. 1756–1762.
41. Huang L., Liu Z., Liu Y. Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012. Vol. 40. P. 74–80.
42. Posner R., Santa M., Grundmeier G. Wet- and corrosive de-adhesion processes of water-borne epoxy film coated steel // *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158. P. C29–C35.
43. Sun J., Gong J., Li G. A lattice Boltzmann model for solidification of water droplet on cold flat plate // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 59. P. 53–64.
44. Chaudhary G., Li R. Freezing of water droplets on solid surfaces: An experimental and numerical study // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 57. P. 86–93.
45. Zhang X., Wu X., Min J. Freezing and melting of a sessile water droplet on a horizontal cold plate // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017. Vol. 88. P. 1–7.
46. Lei G.-L., Dong W., Zheng M. et al. Numerical investigation on heat transfer and melting process of ice with different porosities // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 107. P. 934–944.
47. Ryzhkin I.A., Petrenko V.F. Physical mechanisms responsible for ice adhesion // *Journal of Physical Chemistry*. 1997. Vol. 101. P. 6267–6270.
48. Wilen L.A., Wettlaufer J.S., Elbaum M., Schick M. Dispersion-force effects in interfacial premelting of ice // *Physical review*. 1995. Vol. 52. P. 12426–12433.

49. Hao P., Lv C., Zhang X. Freezing of sessile water droplets on surfaces with various roughness and wettability // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104 (16). P. 161609.
50. Pervier M.L.A., Lerma L.G., Moncholi P.M., Hammond D.W. A new test apparatus to measure the adhesive shear strength of impact ice on titanium 6Al-4V alloy // *Engineering Fracture Mechanics*. 2019. Vol. 214. P. 212–222.
51. Attarzadeh R., Dolatabadi A. Icephobic performance of superhydrophobic coatings: A numerical analysis // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 136. P. 1327–1337.
52. Wang C., Chang S., Leng M. et al. A two-dimensional splashing model for investigating impingement characteristics of supercooled large droplets // *International Journal of Multiphase Flow*. 2015. Vol. 12. P. 2–51.
53. Zhang X., Min J., Wu X. Model for aircraft icing with consideration of property-variable rime ice // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 97. P. 185–190.
54. Zhang X., Wu X., Min J. Aircraft icing model considering both rime ice property variability and runback water effect // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104. P. 510–516.
55. Zhang X., Liu X., Wu X., Min J. Impacting-freezing dynamics of a supercooled water droplet on a cold surface: Rebound and adhesion // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 158. P. 119997.
56. Jin Z., Sui D., Yang Z. The impact, freezing, and melting processes of a water droplet on an inclined cold surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 90. P. 439–453.
57. Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K. et al. Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2 (11). P. 3100–3110.
58. Tong W., Xiong D., Wang N. et al. Mechanically robust superhydrophobic coating for aeronautical composite against ice accretion and ice adhesion // *Composites. Part B: Engineering*. 2019. P. 107267.
59. Sivakumar G., Jackson J., Ceylan H., Sundararajan S. Effect of plasticizer on the wear behavior and ice adhesion of elastomeric coatings // *Wear*. 2019. Vol. 426–427. Part A. P. 212–218.
60. Wang C., Zhang W., Siva A. et al. Laboratory test for ice adhesion strength using commercial instrumentation // *Langmuir*. 2014. Vol. 30. P. 540–547.
61. Susoff M., Siegmann K., Pfaffenroth C., Hirayama M. Evaluation of icephobic coatings – Screening of different coatings and influence of roughness // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 282. P. 870–879.
62. Bharathidasan T., Kumar S.V., Bobji M. et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 314. P. 241–250.
63. Douglass R.G., Palacios J.L. Effects of strain rate variation on the shear adhesion strength of impact ice // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. Vol. 181. P. 103168.
64. Höhne S., Hoch C., Böhm C. et al. A new measuring system for the determination of the ice adhesion strength on smooth surfaces // *Langmuir*. 2020. Vol. 36 (16). P. 4465–4476.
65. Douglas R.G., Palacios J., Schneeberger G. Design, fabrication, calibration, and testing of a centrifugal ice adhesion test rig with strain rate control capability // *Proceedings of the 2018 Atmospheric and Space Environments Conference*. Atlanta, 2018. P. 3342.
66. Zhang Z., Hu H., Bai X., Hu H. An experimental study on the detrimental effects of deicing fluids on the performance of icephobic coatings for aircraft icing mitigation // *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 119. P. 107090.
67. Shah H., Moncholi E.P., Hong-hu J., Hammond D.W. Determination of ice adhesion and ice properties in order to determine ice shedding procedure of coating systems // *14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Chongqing, 2011. P. 1–6.
68. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L. Eliciting a human understandable model of ice adhesion strength for rotor blade leading edge materials from uncertain experimental data // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39 (11). P. 10212–10225.
69. Palacio J.L., Han Y., Brouwers E.W., Smith E.C. Icing environment rotor test stand liquidwater content measurement procedures and ice shape correlation // *Journal of the American Helicopter Society*. 2002. Vol. 57 (2). P. 22006.

70. Zheng Q., Lv J., Zhang J., Feng J. Fabrication and application of icephobic silicone coatings on epoxy substrate // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 161. P. 106483.
71. Carreño F., Gude M.R., Calvo S. et al. Design and development of icephobic coatings based on sol-gel/modified polyurethane paints // *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 25. P. 101616.
72. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Соловьянич Л.В., Большаков В.А., Павлюк Б.Ф., Бадамшина Э.Р., Джалмуханова А.С., Карпов С.В. Исследование зависимости адгезии льда к полиуретановым покрытиям от их физико-механических свойств // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-87-95.
73. Дринберг А.С., Тарасова И.Н., Недведский Г.Р. Лакокрасочные материалы с пониженной адгезией ко льду // *ЛКМ и их применение*. 2021. № 3. С. 16–19.
74. Mirshahidi K., Alasvand Zarasvand K., Luo W., Golovin K. A high throughput tensile ice adhesion measurement system // *HardwareX*. 2020. Vol. 8. P. e00146.
75. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M. Superhydrophobic versus SLIPS: Temperature dependence and the stability of ice adhesion strength // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 606. P. 556–566.
76. Schneeberger G.M., Kozlowski R., Wolfe D., Palacios J.L. Development of a durable ice protective coating for use on rotorcraft // *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 193. P. 103427.
77. Yang S., Xia Q., Zhu L. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257 (11). P. 4956–4962.
78. Rönneberg S., Zhuo Y., Laforte C. et al. Interlaboratory Study of Ice Adhesion Using Different Techniques // *Coatings*. 2019. Vol. 9 (10). P. 678.
79. Woll T.R. Ice Adhesion analysis of severely aged PDMS rubbers: M.S. Thesis. University of Denver, 2018. 79 p. URL: <https://digitalcommons.du.edu/etd/1504/> (дата обращения: 19.03.2022).

References

1. Venkataramani K., McVey L., Holm R., Montgomery K. Inclement weather considerations for aircraft engines. *45th Aerospace sciences meeting and exhibit*. Reno, Nevada, 2007, pp. 695.
2. Kablov E.N. Aviation materials science in the XXI century. Prospects and tasks. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS; VIAM, 2002, pp. 23–47.
3. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
4. Ignatyev D.I., Khrabrov A.N., Kortukova A.I. et al. Interplay of unsteady aerodynamics and flight dynamics of transport aircraft in icing conditions. *Aerospace Science and Technology*, 2020, vol. 104, pp. 105914.
5. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V. et al. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, vol. 105, pp. 74–97.
6. Cebeci T., Kafyeke F. Aircrafticing. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 35 (1), pp. 11–21.
7. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
8. Lynch F.T., Khodadoust A. Effects of Ice Accretions on aircraft Aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, vol. 37, pp. 669–767.
9. Airworthiness directives. Boeing aircraft. *Federal Register*, 2016, vol. 81, no. 78, pp. 23581–23586.

10. Mason J., Strapp J., Chow P. The Ice Particle Threat to Engines in Flight. *45th Aerospace sciences meeting and exhibit*. Reno, Nevada, 2006, p. 206.
11. Kamel M. Al-Khalil, Theo G. Keith, Kenneth J. De Witt. Icing calculations on a typical commercial jet engine inlet nacelle. *Journal of Aircraft*, 1997, vol. 34, no. 1, pp. 87.
12. Zheng M., Guo Z., Dong W., Guo X. Experimental investigation on ice accretion on a rotating aero-engine spinner with hydrophobic coating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 404–414.
13. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L. Eliciting a human understandable model of ice adhesion strength for rotor blade leading edge materials from uncertain experimental data. *Expert Systems with Applications*, 2012, vol. 39, pp. 10212–10225.
14. *Flight in icing conditions: AC 91-74B – Pilot Guide*. 2015. Available at: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/1028388 (accessed: March 19, 2022).
15. Zhang Z., Liu X. Control of ice nucleation: freezing and antifreeze strategies. *Chemical Society Reviews*, 2018, vol. 47, pp. 7116–39.
16. Li Q., Guo Z. Fundamentals of icing and common strategies for designing biomimetic anti-icing surfaces. *Journal of Materials Chemistry*, 2018, vol. 6, pp. 13549–13581.
17. Zheng H.K., Chang S.N., Zhao Y.Y. Anti-icing and icephobic mechanism and applications of superhydrophobic/ultra slippery surface. *Progress in Chemistry*, 2017, vol. 29 (1), pp. 102–118.
18. Tarasova P.N., Sleptsova S.A., Laukkanen S., Dyakonov A.A. Sealing materials based on polytetrafluoroethylene for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 24, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
19. Solovyanchik L.V., Pykhtin A.A., Vednikova V.S., Kondrashov S.V., Pavlyuk B.F. Investigation of the effect of silicon dioxide nanoparticles on the surface properties of organosilicon coatings. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 2019, vol. 14, pp. 31–36.
20. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Constructional polymer composites with functional properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
21. Buznik V.M., Kablov E.N. Materials for the development of the Arctic and cold territories. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols*. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 21.
22. Yang S., Xia Q., Zhu L. et al. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, pp. 4956–4962.
23. Golovin K., Kobaku S.P.R., Lee D.H. et al. Designing durable icephobic surfaces. *Science Advances*, 2016, vol. 2, pp. 1–12.
24. Hakimian A., Nazifi S., Ghasemi H. Ice Adhesion: Mechanism, Measurement and Mitigation. *Metrology of Ice Adhesion*. Scrivener Publishing LLC, 2020, pp. 217–236. DOI: 10.1002/9781119640523.ch8.
25. Rönneberg S., He J., Zhang Z. The need for standards in low ice adhesion surface research: a critical review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019, vol. 34 (3), pp. 319–347.
26. Bleszynski M., Clark E. Current Ice Adhesion Testing Methods and the Need for a Standard: A Concise Review October. *Standards*, 2021, vol. 1 (2), pp. 117–133.
27. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 65, pp. 88–96.
28. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D. et al. Durable and scalable icephobic surfaces: similarity and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*, 2016, vol. 12, pp. 1938–1963.
29. Fortin G., Laforte J., Ilinca A. Heat and mass transfer during ice accretion on aircraft wings with an improved roughness model. *International Journal of Thermal Sciences*, 2006, vol. 45, pp. 595–606.
30. Amendola A., Mingione G. On the problem of icing for modern civil aircraft. *Air & Space Europe*, 2001, vol. 3 (3/4), pp. 214–217.
31. Zhang C., Liu H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing. *Physics of Fluids*, 2016, vol. 28, pp. 062107.

32. Lian Y., Guo Y. Investigation of the splashing phenomenon of large droplets for aviation safety. *SAE Technical Paper*, 2015, pp. 2015-01-2100.
33. Cao Y., Tan W., Wu Z. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 75, pp. 353–385.
34. Isaac G.A., Cober S.G., Strapp J.W. et al. Recent Canadian research on aircraft in-flight icing. *National Research Council Canada*, 2001, vol. 47, pp. 213–221.
35. Zhu D., Zhao C., Liu H. New ice accretion model for aircraft icing based on phase-field method. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, p. 5693.
36. Wang Y., Dandekar R., Bustos N. et al. Universal Rim Thickness in Unsteady Sheet Fragmentation. *Physical review letters*, 2018, vol. 120, p. 204503.
37. Tropea C., Schremb M., Roisman I.V. Physics of SLD Impact and Solidification. *7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences*. Milan, 2017, p. 512.
38. Wang Y., Cheng Y. New perspectives on the droplet freezing nucleation and early crystal growth mechanisms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 40, pp. 1023–1028.
39. Sun M., Kong W., Wang F., Liu H. Impact freezing modes of supercooled droplets determined by both nucleation and icing evolution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 142, p. 118431.
40. Xu Q., Li Z., Wang J., Wang R. Characteristics of single droplet impact on cold plate surfaces. *Drying Technology*, 2012, vol. 30 (15), pp. 1756–1762.
41. Huang L., Liu Z., Liu Y. Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, vol. 40, pp. 74–80.
42. Posner R., Santa M., Grundmeier G. Wet- and corrosive de-adhesion processes of water-borne epoxy film coated steel. *Journal of The Electrochemical Society*, 2011, vol. 158, pp. C29–C35.
43. Sun J., Gong J., Li G. A lattice Boltzmann model for solidification of water droplet on cold flat plate. *International Journal of Refrigeration*, 2015, vol. 59, pp. 53–64.
44. Chaudhary G., Li R. Freezing of water droplets on solid surfaces: An experimental and numerical study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, vol. 57, pp. 86–93.
45. Zhang X., Wu X., Min J. Freezing and melting of a sessile water droplet on a horizontal cold plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 88, pp. 1–7.
46. Lei G.-L., Dong W., Zheng M. et al. Numerical investigation on heat transfer and melting process of ice with different porosities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 107, pp. 934–944.
47. Ryzhkin I.A., Petrenko V.F. Physical mechanisms responsible for ice adhesion. *Journal of Physical Chemistry*, 1997, vol. 101, pp. 6267–6270.
48. Wilen L.A., Wettlaufer J.S., Elbaum M., Schick M. Dispersion-force effects in interfacial premelting of ice. *Physical review*, 1995, vol. 52, pp. 12426–12433.
49. Hao P., Lv C., Zhang X. Freezing of sessile water droplets on surfaces with various roughness and wettability. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104 (16), p. 161609.
50. Pervier M.L.A., Lerma L.G., Moncholi P.M., Hammond D.W. A new test apparatus to measure the adhesive shear strength of impact ice on titanium 6Al–4V alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 214, pp. 212–222.
51. Attarzadeh R., Dolatabadi A. Icephobic performance of superhydrophobic coatings: A numerical analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 1327–1337.
52. Wang C., Chang S., Leng M. et al. A two-dimensional splashing model for investigating impingement characteristics of supercooled large droplets. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, vol. 12, pp. 2–51.
53. Zhang X., Min J., Wu X. Model for aircraft icing with consideration of property-variable rime ice. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 97, pp. 185–190.
54. Zhang X., Wu X., Min J. Aircraft icing model considering both rime ice property variability and runback water effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 104, pp. 510–516.
55. Zhang X., Liu X., Wu X., Min J. Impacting-freezing dynamics of a supercooled water droplet on a cold surface: Rebound and adhesion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 158, p. 119997.

56. Jin Z., Sui D., Yang Z. The impact, freezing, and melting processes of a water droplet on an inclined cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 90, pp. 439–453.
57. Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K. et al. Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, vol. 2 (11), pp. 3100–3110.
58. Tong W., Xiong D., Wang N. et al. Mechanically robust superhydrophobic coating for aeronautical composite against ice accretion and ice adhesion. *Composites. Part B: Engineering*, 2019, p. 107267.
59. Sivakumar G., Jackson J., Ceylan H., Sundararajan S. Effect of plasticizer on the wear behavior and ice adhesion of elastomeric coatings. *Wear*, 2019, vol. 426–427, part A, pp. 212–218.
60. Wang C., Zhang W., Siva A. et al. Laboratory test for ice adhesion strength using commercial instrumentation. *Langmuir*, 2014, vol. 30, pp. 540–547.
61. Susoff M., Siegmann K., Pfaffenroth C., Hirayama M. Evaluation of icephobic coatings – Screening of different coatings and influence of roughness. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 282, pp. 870–879.
62. Bharathidasan T., Kumar S.V., Bobji M. et al. Effect of wettability and surface roughness on ice-adhesion strength of hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 314, pp. 241–250.
63. Douglass R.G., Palacios J.L. Effects of strain rate variation on the shear adhesion strength of impact ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, vol. 181, p. 103168.
64. Höhne S., Hoch C., Böhm C. et al. A new measuring system for the determination of the ice adhesion strength on smooth surfaces. *Langmuir*, 2020, vol. 36 (16), pp. 4465–4476.
65. Douglas R.G., Palacios J., Schneeberger G. Design, fabrication, calibration, and testing of a centrifugal ice adhesion test rig with strain rate control capability. *Proceedings of the 2018 Atmospheric and Space Environments Conference*. Atlanta, 2018, p. 3342.
66. Zhang Z., Hu H., Bai X., Hu H. An experimental study on the detrimental effects of deicing fluids on the performance of icephobic coatings for aircraft icing mitigation. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 119, p. 107090.
67. Shah H., Moncholi E.P., Hong-hu J., Hammond D.W. Determination of ice adhesion and ice properties in order to determine ice shedding procedure of coating systems. *14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Chongqing, 2011, pp. 1–6.
68. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L. Eliciting a human understandable model of ice adhesion strength for rotor blade leading edge materials from uncertain experimental data. *Expert Systems with Applications*, 2012, vol. 39 (11), pp. 10212–10225.
69. Palacio J.L., Han Y., Brouwers E.W., Smith E.C. Icing environment rotor test stand liquidwater content measurement procedures and ice shape correlation. *Journal of the American Helicopter Society*, 2002, vol. 57 (2), p. 22006.
70. Zheng Q., Lv J., Zhang J., Feng J. Fabrication and application of icephobic silicone coatings on epoxy substrate. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 161, p. 106483.
71. Carreño F., Gude M.R., Calvo S. et al. Design and development of icephobic coatings based on sol-gel/modified polyurethane paints. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 25, pp. 101616.
72. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Solovyanchik L.V., Bolshakov V.A., Pavlyuk B.Ph., Badamshina E.R., Dzhalmukhanova A.S., Karpov S.V. Research of dependence of adhesion of ice to polyurethane coatings from their physicommechanical properties. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-87-95.
73. Drinberg A.S., Tarasova I.N., Nedvedsky G.R. Paintwork materials with reduced adhesion to ice. *LKM i ikh primeneniye*, 2021, no. 3, pp. 16–19.
74. Mirshahidi K., Alasvand Zarasvand K., Luo W., Golovin K. A high throughput tensile ice adhesion measurement system. *HardwareX*, 2020, vol. 8, p. e00146.
75. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M. Superhydrophobic versus SLIPS: Temperature dependence and the stability of ice adhesion strength. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 606, pp. 556–566.

76. Schneeberger G.M., Kozlowski R., Wolfe D., Palacios J.L. Development of a durable ice protective coating for use on rotorcraft. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, vol. 193, p. 103427.
77. Yang S., Xia Q., Zhu L. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257 (11), pp. 4956–4962.
78. Rönneberg S., Zhuo Y., Laforte C. et al. Interlaboratory Study of Ice Adhesion Using Different Techniques. *Coatings*, 2019, vol. 9 (10), p. 678.
79. Woll T.R. *Ice Adhesion analysis of severely aged PDMS rubbers*: M.S. Thesis. University of Denver, 2018, 79 p. Available at: <https://digitalcommons.du.edu/etd/1504/> (accessed: March 19, 2022).

Информация об авторах

Марченко Сергей Андреевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Железняк Вячеслав Геннадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кузнецова Вера Аркадьевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergei A. Marchenko, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav G. Zheleznyak, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vera A. Kuznetsova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.07.2022.

The article was submitted 30.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 08.07.2022.