

Научная статья

УДК 692.7.0

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177603>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА НА ВИБРАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА МАЛОГАБАРИТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Владимир Яковлевич Модорский¹, Станислав Львович Калюлин²✉, Николай Алексеевич Саженов³

^{1, 2, 3} Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

¹ modorsky@pstu.ru

² ksl@pstu.ru ✉

³ sazhenkov_na@mail.ru

Аннотация. Описана специальная экспериментальная установка, представляющая собой малогабаритную аэродинамическую трубу, которая позволяет проводить исследования процессов обледенения вентиляторов беспилотных летательных аппаратов, а также оценивать влияние разрушения льда на их вибрационное состояние. Предложена экспериментальная методика оценки вибрационного состояния вентиляторов в процессе обледенения. Полученные с помощью разработанной экспериментальной методики данные показывают, что разрушение льда в процессе работы вентилятора может приводить к росту виброскоростей, замеряемых на опоре двигателя, в 5 раз, с 0,6 до 3 мм/с.

Ключевые слова: малогабаритная аэроохлаждающая труба, экспериментальное исследование обледенения, виброметрирование вентилятора летательного аппарата, противообледенительные системы летательных аппаратов

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-20118 и Минобрнауки Пермского края (Соглашение №с-26/1203 от 30.06.2022).

Для цитирования: Модорский В.Я., Калюлин С.Л., Саженов Н.А. Экспериментальная установка для оценки влияния обледенения и разрушения льда на вибрационное состояние модельного вентилятора малогабаритного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 19–26. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177603>

Original article

EXPERIMENTAL TEST RIG FOR ASSESSING ICING AND ICE DESTRUCTION EFFECT ON THE MODEL FAN VIBRATIONS OF A SMALL-SIZED AIRCRAFT

Vladimir Ya. Modorskii¹, Stanislav L. Kalyulin²✉, Nikolai A. Sazhenkov³

^{1, 2, 3} Perm national research polytechnic university,

Perm, Russia

¹ modorsky@pstu.ru

² ksl@pstu.ru ✉

³ sazhenkov_na@mail.ru

Abstract

The article describes a special experimental test rig, representing a small-sized wind tunnel, which allows studying the processes of unmanned aerial vehicles fans icing of, as well as evaluating the effect of ice destruction on their vibrational state.

The experimental test rig allows the following:

- video recording of icing and ice destruction processes on a rotating fan at shooting speeds up to 960 frames per second (and more with the flashbulb employing);
- change the stiffness and weight of model fan blades by installing fans of various configurations on the rotor shaft;
- temperature control in the flow path within the range from -30 up to 25°C with an accuracy of 0.5°C ;
- relative humidity control in the flow path within the range from 20 to 100% with an accuracy of 2-5%;
- fan rotor speed control within the range up to 15,000 rpm;
- static pressure measuring in the flow path within the range of 30,000–110,000 Pa;
- the flow velocity measuring within the range of 0–100 m/s;
- vibration accelerations measuring on supports or body parts of the installation within the frequency range up to 12 kHz in various directions.

The authors proposed an experimental method for assessing the fans vibrational state in the process of icing. The data obtained with the proposed experimental technique demonstrate that the destruction of ice during the fan operation can lead to an increase in vibration velocities measured on the engine support by a factor of 5, from 0.6 mm/s to 3 mm/s. The standard level of vibration accelerations recorded herewith on the fan housing in the absence of ice on the blades is 0.01 mm/s. The effect of the change in the local characteristics of the fan blades surface impact on the ice adhesion was found, which, as a result, can be used to reduce the fan speed at which ice breakage is observed.

One of the further trends of possible experimental research is the study of the mechanical properties of the surfaces of fan blades effect on the properties of ice adhesion.

Keywords: small-sized aero-cooling tunnel, experimental study of icing, aircraft fan vibrometering, aircraft anti-icing systems

Funding: The work was performed with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 22-19-20118 and the Ministry of Education and Science of the Perm Territory (Agreement No. c-26/1203 dated June 30, 2022).

For citation: Modorskii V.Ya., Kalyulin S.L., Sazhenkov N.A. Experimental Test Rig for Assessing Icing and Ice Destruction Effect on the Model Fan Vibrations of a Small-Sized Aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 19–26. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177603>

Введение

Существует множество подходов к исследованию процессов обледенения в гражданской авиации, применительно как к летательным аппаратам, так и к их двигательным установкам. Причем экспериментальные работы в этой области в основном посвящены оценке влияния образования наледи на аэродинамические и эксплуатационные характеристики планеров и двигательных установок [1–3].

В отдельный класс экспериментальных задач можно выделить исследования образования и разрушения льда на вращающихся рабочих лопатках вентиляторов газотурбинных двигателей [1, 3–6].

Расчетные исследования на тему обледенения, в свою очередь, могут быть посвящены выбору подходов к моделированию процесса образования льда, идентификации параметров используемых в этих подходах моделей, а также особенностям применения динамических сеточных моделей для моделирования ледяных наростов [7–10,11].

Некоторые расчетные исследования предполагают непосредственное применение известных математических методов для оценки влияния образования льда на аэродинамическую эффективность отдельных элементов летательного аппарата или двигателя [11–13].

Нормативные требования к эксплуатации крупногабаритной гражданской авиационной техники предусматривают различные условия обледенения, однако анализ открытых литературных источников [14–16] позволяет говорить о том, что в настоящее время отсутствует единая методика оценки эффективности функционирования малогабаритных летательных аппаратов в сложных метеорологических условиях, хотя их широкое применение предусматривается при проведении поисково-спасательных работ, аэрофотосъемки и патрулировании российской морской экономической зоны в Арктике [17].

Как и в турбовентиляторных силовых установках, образование льда на лопатках вентиляторов

малогабаритных летательных аппаратов может явиться причиной снижения тяговых характеристик и повышения вибраций, что в некоторых случаях может привести к повреждению конструкции силовой установки. Контроль вибрационного состояния двигательных установок малогабаритных летательных аппаратов, при наличии обледенения, и разработка нормативных мероприятий по сбросу льда позволят предотвратить критическое повреждение этих систем в процессе эксплуатации.

Противообледенительные системы (ПОС), применяемые в конструкции пассажирских и грузовых самолетов и их двигательных установок [18, 19], из-за своей сложности или необходимости наличия вспомогательных систем, не всегда могут быть применены в составе малогабаритных летательных аппаратов. Альтернативным способом удаления льда с вращающихся лопастей вентиляторов, в данном случае, может послужить кратковременное повышение частоты вращения ротора. Такой метод «перегазовки» позволяет повысить действующие на присоединенную к лопастям массу льда центробежные силы и вызвать обрыв наледи при превышении ими сил адгезии льда к поверхности лопастей [6, 20].

Особый интерес представляет изучение влияния механических характеристик поверхности на когезионные свойства интерфейса «лопатка-лед». Авторами выдвинута гипотеза, что на процесс разрушения льда вследствие «перегазовки» могут влиять жесткость лопастей вентиляторов, качество и чистота их поверхностей, геометрия профиля.

Исследование вышеупомянутых эффектов невозможно без разработки и использования экспериментальной аэрохолодильной трубы. Авторами статьи представлено решение задачи проектирования экспериментальной установки для исследования процессов обледенения малогабаритных вентиляторов, а также влияния образования и обрыва льда на их вибрационные характеристики. Такая экспериментальная установка и получаемые на ней экспериментальные данные могут быть также использованы для верификации численных моделей образования льда на вращающихся вентиляторах.

Экспериментальная установка

Разработанная экспериментальная установка представляет собой малогабаритную аэрохолодильную трубу (рис. 1). Проточная часть 1 аэрохолодильной трубы выполнена в виде цилиндра постоянного сечения из прозрачного плексигласа. Конструкция дает возможность устанавливать различные исследуемые модельные вентиляторы 2 внутри проточной части на вал электродвигателя 3. Выбранный электродвигатель позволяет достигать частот вращения вала вентилятора 15 000 об/мин.

Проточная часть размещена на каркасе 4 для точного и жесткого позиционирования. За вентилятором расположен радиусный обтекатель 5, используемый для снижения потерь полного давления. Возможность намораживания льда обеспечивается размещением вышеописанной конструкции внутри

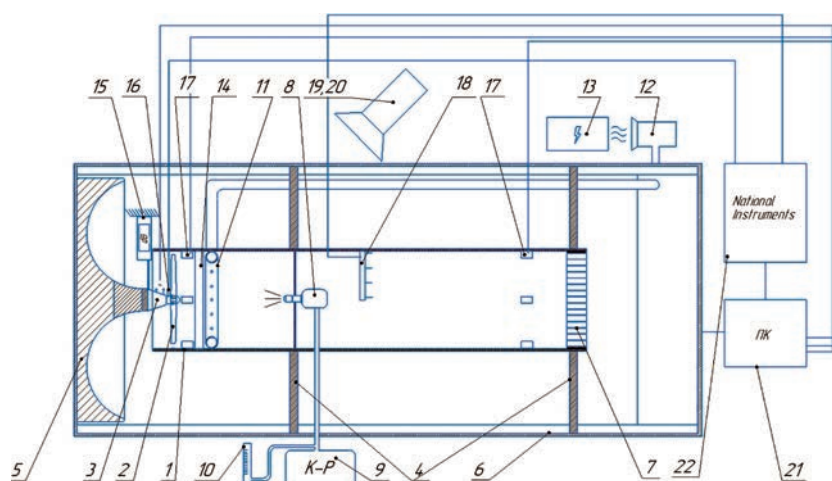


Рис. 1. Итоговая схема экспериментальной установки: 1 – проточная часть; 2 – модельный вентилятор; 3 – электродвигатель; 4 – каркас; 5 – радиусный обтекатель; 6 – холодильная камера; 7 – спрямляющая решетка; 8 – форсуночный блок; 9 – компрессор; 10 – мерная емкость с дистиллированной водой; 11 – ВТ ПОС; 12 – электрический насос; 13 – теплоизлучатель; 14 – электротепловая противообледенительная система (ЭТПОС); 15 – виброметр; 16 – акселерометры; 17 – цифровые датчики температуры, влажности, давления; 18 – термопары; 19 – высокоскоростная камера; 20 – высокоскоростная вспышка; 21 – система управления; 22 – National Instrument

закрытой холодильной установки 6, позволяющей контролировать температуру в проточной части в диапазоне от -30 до $+25^{\circ}\text{C}$ с точностью до $0,5^{\circ}\text{C}$.

Холодильная установка имеет оптически-прозрачную стеклянную верхнюю поверхность, что дает возможность видеофиксации процессов обледенения и разрушения льда на скорости до 960 кадр/с.

Спрямяющая решетка 7 позволяет выравнивать входящий в трубу поток, а также снизить потери полного давления. Форсунка 8 служит для распыла мелкодисперсного водного облака, которое является источником капель переохлажденной жидкости. Для распыла дистиллированная вода из мерной емкости 10 подается в форсунку 8 под давлением из компрессора 9.

В конструкции экспериментальной установки предусмотрена воздушно-тепловая противообледенительная система (ВТ ПОС) 11, представляющая собой гибкий канал с внутренним диаметром 12 мм в форме кольца, прилегающего к внутренней стенке проточного тракта. В канале выполнены отверстия диаметром 2 мм с шагом 20 мм, направленные в центр проточного тракта. Внутрь гибкого канала нагнетается нагретый воздух из электрического насоса 12, подогреваемый теплоизлучателем 13.

Пьезоакселерометры РСВ Piezotronics 16 и контактный виброметр 15 служат для оценки вибрационного состояния ротора в процессе работы, при обледенении и сбросе льда, в диапазоне измеряемых частот до 12 кГц. Пьезоакселерометры интегрированы в систему сбора и обработки информации 22 на базе системы National Instruments и позволяют измерять временные сигналы виброускорений, строить амплитудно-частотные характеристики, оценивать демпфирование системы на резонансных режимах при различном уровне обледенения.

Параметры рабочего тела измеряются с помощью датчиков 17, которые позволяют получить моментальные значения влажности, давления ($30 \dots 110$ кПа) и температуры ($-30 \dots 25^{\circ}\text{C}$). Они расположены в двух сечениях — после спрямяющей решетки на входе в проточный тракт и перед вентилятором. В каждом сечении размещено по четыре датчика вблизи стенки трубы с равномерным шагом по длине окружности.

Для фотофиксации процесса обледенения и разрушения льда за пределами холодильной камеры размещена высокоскоростная камера 19 с синхронизированной вспышкой 20.

Управление режимом работы электродвигателя, мощностью холодильной камеры, опрос и запись сигналов всего измерительного оборудования осуществляются с помощью персонального компьютера 21 и программного обеспечения, разработанного

на языке LabView.

На аппаратном уровне система сбора и обработки информации 22 состоит из крейта PXI-SCXI со встроенным контроллером, монитора, термодатчика SCXI-1102B, терминального блока SCXI-1303.

Для оценки равномерности распределения статической температуры в радиальном направлении проточного тракта установлены четыре хромель-алюмелевые термопары ЕТР-01А типа К диаметром 0,2 мм 18, размещенные гребенкой на различных радиусах поперек потока на металлическом кронштейне ($R = 5, 15, 35, 45$ мм). Возможный диапазон измерения температуры потока от -50 до 400°C .

На рис. 2 представлены фотографии разработанной экспериментальной установки.

Отработка методики эксперимента

С помощью разработанной экспериментальной установки было проведено исследование по оценке влияния обледенения и схода льда с лопастей вентилятора на вибрационное состояние ротора.

Намораживание льда осуществлялось при частоте вращения 5000 об/мин и температуре воздуха в проточной части -10°C . Подача воды проводилась распылом через форсуночный блок с давлением подачи воздуха 4 атм, водность потока составляла 0,8 г/м³, среднегеометрический диаметр капель 150 мкм. Измеренная скорость потока воздуха на входе в проточную часть составила 3,1 м/с, влажность — 60%. Общее время обледенения — 120 с.

На рис. 3,а представлена форма ледяных наростов на лопастях вентилятора в конечный момент времени.

После завершения процесса обледенения частота вращения вентилятора повышалась до 7000 об/мин, что привело к разрушению ледяного нароста на лопатке вентилятора с наклеенной меткой (рис. 3,б). При этом с остальных трех лопаток ледяные наросты не сошли. Скорее всего, такой эффект связан с локальным изменением характеристик адгезии льда к поверхности лопасти, вследствие неоднородности свойств поверхности вблизи метки.

Это подтверждает предположение о возможности управления свойствами поверхности лопастей вентиляторов (шероховатостью, коэффициентом трения и т. д.) с целью снижения частоты «перегазовки», используемой для сброса с лопастей ледяных наростов.

Окончательно лед был сброшен при достижении частоты вращения ротора 11500 ... 12000 об/мин одновременно с трех лопаток в течение секунды. Таким образом, случайное изменение локальных свойств поверхности одной из лопастей вентилятора привело к снижению на 5000 об/мин частоты

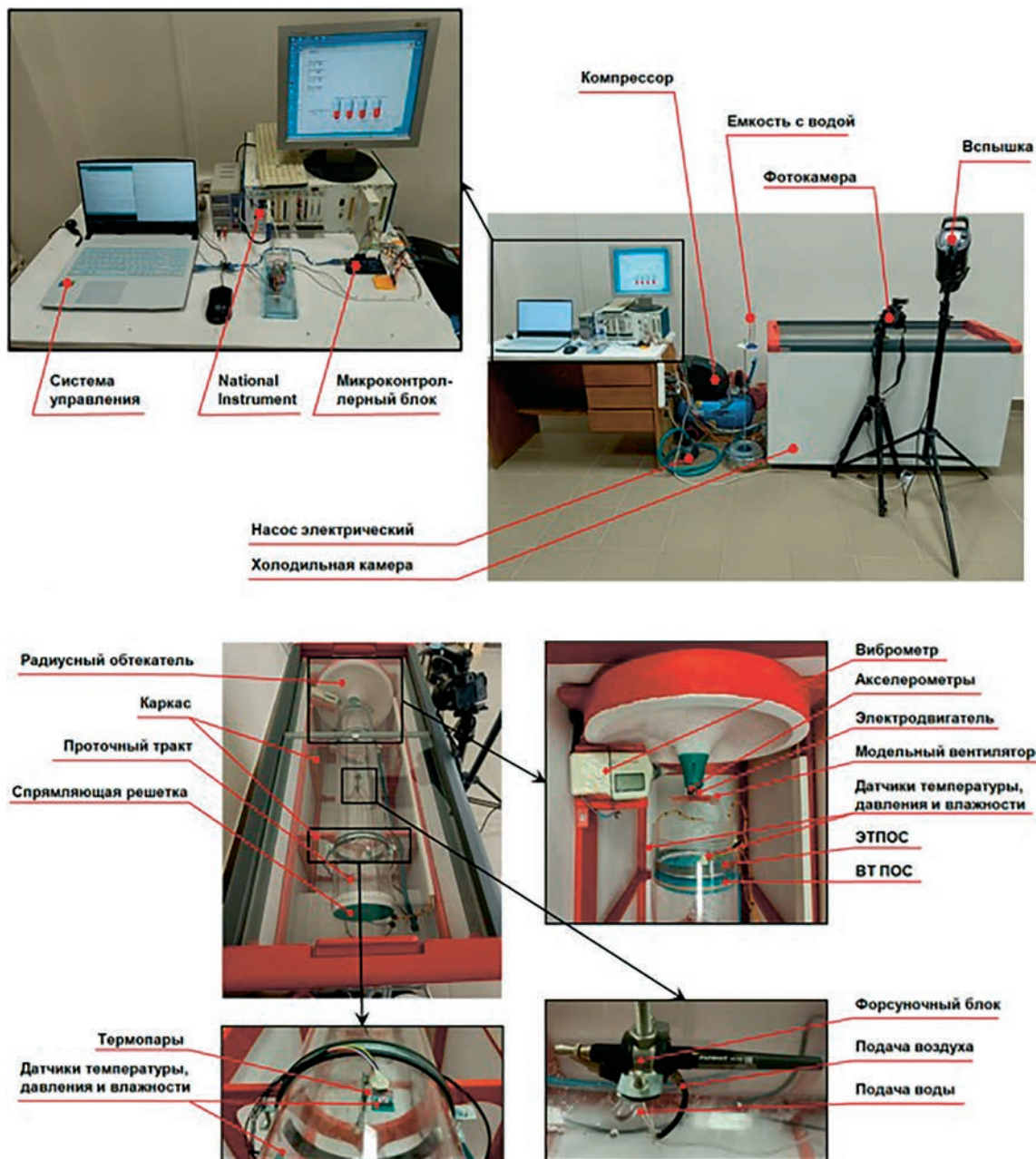


Рис. 2. Фотографии разработанной экспериментальной установки



Рис. 3. Общий вид вентилятора: *а* – после намораживания льда; *б* – после схода льда с одной из лопастей

вращения, при которой наблюдается обрыв льда. Это позволяет сделать вывод, что управляемое изменение свойств поверхности может снизить энергозатраты на «перегазовку» в процессе эксплуатации малогабаритного аппарата и, как следствие, увеличить максимальную продолжительность полета.

Видеосъемка процесса сброса льда с текущим контролем вибраций в опоре крепления электродвигателя позволила описать зависимость виброскорости от времени (рис. 4). Как можно видеть из представленных данных, процесс полного схода льда занимает примерно 3 с. Было выявлено, что наличие льда на поверхностях вентилятора приводит к увеличению регистрируемых виброскоростей до 0,06 мм/с по сравнению со значением 0,01 мм/с, характерным для вращающегося вентилятора без ледяного покрова. В процессе обрыва льда регистрируемые на корпусе вентилятора виброскорости увеличиваются до значений 2,9 мм/с, а затем, после очищения исследуемых поверхностей, примерно за 1 с снижаются до исходного значения 0,01 мм/с.

На рис. 5 представлена кинограмма процесса разрушения льда.

Выводы

1. Разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы обледенения и разрушения льда на вращающихся вентиляторах.
2. Оработана методика экспериментального исследования влияния процессов обледенения и разрушения льда на вибрационные характеристики вращающихся вентиляторов.
3. Стандартный уровень регистрируемых на корпусе вентилятора виброскоростей при отсутствии льда на лопастях составляет 0,01 мм/с.
4. Выявлено, что наличие ледяной корки на поверхностях исследуемого вентилятора приводит в

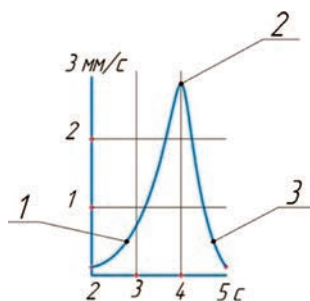


Рис. 4. Виброхарактеристика процесса сброса льда с лопастей вентилятора: 1 – нарастание вибрации при локальном сбросе льда; 2 – максимальный уровень вибрации при активном сбросе льда с лопастей; 3 – возвращение вентилятора в динамически устойчивое положение после полного сброса льда

росту измеряемых на корпусе вентилятора виброскоростей до 0,06 мм/с.

5. Частота вращения ротора вентилятора, при которой наблюдается обрыв ледяного покрова с поверхностей вентилятора, находится в диапазоне 11500 ... 12000 об/мин.

6. Обрыв ледяного покрова с поверхностей исследуемого вентилятора приводит к росту регистрируемых виброскоростей до 2,9 мм/с. При этом весь процесс обрыва ледяного покрова занимает ~ 3 с.

7. Случайное изменение локальных свойств поверхности одной из лопаток привело к снижению частоты вращения вентилятора, при которой наблюдается обрыв льда, до 5000 об/мин.

8. Одним из возможных направлений дальнейших экспериментальных исследований является изучение влияния механических свойств поверхностей лопастей вентиляторов на свойства адгезии льда.

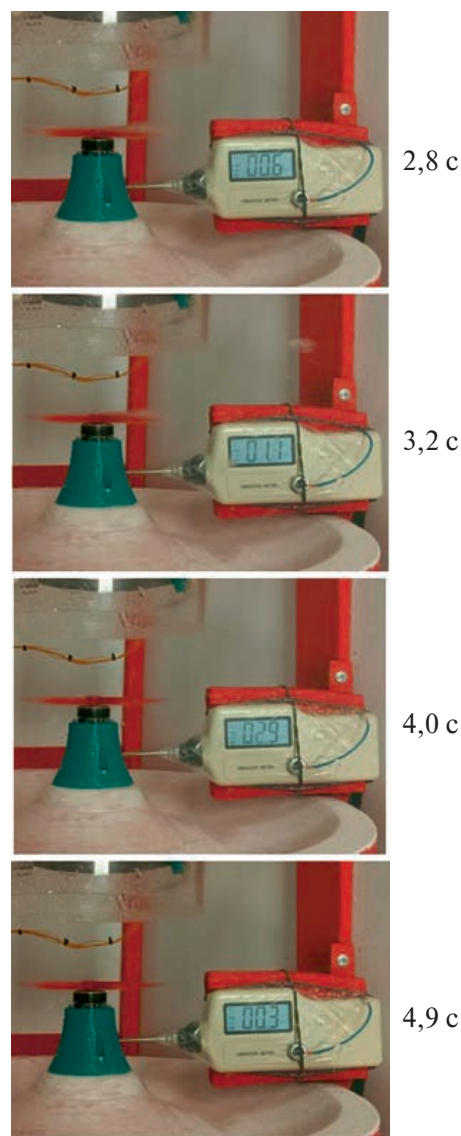


Рис. 5. Кинограмма процесса разрушения

Список источников

1. Каджардузов П.А., Эзрохи Ю.А. Влияние обледенения на характеристики двухконтурных ГТД в условиях ледяных кристаллов // *Авиационные двигатели*. 2019. № 1(2). С. 75–81. DOI: 10.54349/26586061_2019_1_75
2. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Особенности автоматического управления режимом работы ГТД при кристаллическом обледенении // *Системы автоматического управления авиационными силовыми установками: Сборник научных трудов / Под ред. О.С. Гуревича*. М.: Изд-во ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 35–40.
3. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Оценка ухудшения характеристик ГТД при кристаллическом обледенении и возможностей его компенсации методами управления // *Авиационные двигатели*. 2019. № 3(4). С. 17–24. DOI: 10.54349/26586061_2019_3_17
4. Mason J.G., Chow P., Fuleki D.M. Understanding ice crystal accretion and shedding phenomenon in jet engines using a rig test // *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air* (14–18 June 2010; Glasgow, UK). Paper No. GT2010-22550, pp. 169–178. DOI: 10.1115/GT2010-22550
5. Goodwin R.V., Dischinger D.G. Turbofan ice crystal rollback investigation and preparations leading to inaugural ice crystal engine test at NASA PSL-3 test facility // *6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference* (16–20 June 2014; Atlanta, GA). DOI: 10.2514/6.2014-2895
6. Калюлин С.Л., Саженьков Н.А., Модорский В.Я., Владимиров Н.В. Численное моделирование газодинамических и прочностных характеристик вентилятора для экспериментальной установки по исследованию разрушения льда на вращающихся рабочих лопатках // *Вестник ПНИПУ*. 2023. № 1. С. 134–141. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.13
7. Гулимовский И.А., Гребеньков С.А. Применение модифицированного метода поверхностного сеточного обертывания для численного моделирования процессов обледенения // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 2. С. 29–36. DOI: 10.34759/vst-2020-2-29-36
8. Chauvin R., Bennani L., Trontin P., Villedieu P. An implicit time marching Galerkin method for the simulation of icing phenomena with a triple layer model // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2018. Vol. 150, pp. 20–33. DOI: 10.1016/j.finel.2018.07.003
9. Кошелев К.Б., Мельникова В.Г., Стрижак С.В. Разработка решателя iceFoam для моделирования процесса обледенения // *Труды Института системного программирования РАН*. 2020. Т. 32. № 4. С. 217–234. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-16
10. Bayeux C., Radenac E., Villedieu P. Theory and Validation of a 2D Finite-Volume Integral Boundary-Layer Method for Icing Applications // *AIAA Journal*. 2018. vol. 57. no. 3. DOI: 10.2514/1.J057461
11. Алексеенко С.В., Приходько А.А. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов // *Ученые записки ЦАГИ*. 2013. Т. 44. № 6. С. 25–57.
12. Белоусов И.Ю., Корнушенко А.В., Кудрявцев О.В., Павленко О.В., Реслан М.Г., Кинса С.Б., Пигусов Е.А. Влияние воздушного винта на аэродинамические характеристики и шарнирные моменты отклоненной механизации крыла в условиях обледенения // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29. № 4. С. 7–21. DOI: 10.34759/vst-2022-4-7-21
13. Павленко О.В., Пигусов Е.А. Особенности применения тангенциального выдува струи на поверхность крыла летательного аппарата в условиях обледенения // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 2. С. 7–15. DOI: 10.34759/vst-2020-2-7-15
14. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами. – Казань: Республиканский центр мониторинга качества образования, 2013. – 768 с.
15. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полета беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2016. № 1. С. 7–15.
16. Клеменков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н. и др. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15. № 4. С. 564–572.
17. Рогозин Е.А., Бокова О.И., Мельников А.В. Основные аспекты совершенствования методики оценки эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2019. № 3. С. 21–33.
18. Резников С.Б., Аверин С.В., Харченко И.А., Третьяк В.И., Коняхин С.Ф. Многофазные импульсные преобразователи для питания авиационных противообледенительных вибраторов // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 3. С. 139–145.
19. Жигулин И.Е., Емельяненко К.А., Сатаева Н.Е. Применение супергидрофобных покрытий для борьбы с обледенением аэродинамических поверхностей самолета // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 1. С. 200–212. DOI: 10.34759/vst-2021-1-200-212
20. Эзрохи Ю.А., Каджардузов П.А. Математическое моделирование рабочего процесса авиационного газотурбореактивного двигателя в условиях обледенения элементов его проточной части // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 4. С. 123–133. DOI: 10.34759/vst-2019-4-123-133

References

1. Kadzharduzov P.A., Ezrokhi Yu.A. *Aviatsionnye dvigateli*, 2019, no. 1(2), pp. 75–81. DOI: 10.54349/26586061_2019_1_75
2. Gurevich O.S., Smetanin S.A., Trifonov M.E. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi silovymi ustanovkami. Sbornik nauchnykh trudov*. Moscow, TsIAM im. P.I. Baranova, 2020, pp. 35–40.
3. Gurevich O.S., Smetanin S.A., Trifonov M.E. *Aviatsionnye dvigateli*, 2019, no. 3(4), pp. 17–24. DOI: 10.54349/26586061_2019_3_17
4. Mason J.G., Chow P., Fuleki D.M. Understanding ice crystal accretion and shedding phenomenon in jet engines using a rig test. *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air (14–18 June 2010; Glasgow, UK)*. Paper No. GT2010-22550, pp. 169–178. DOI: 10.1115/GT2010-22550
5. Goodwin R.V., Dischinger D.G. Turbofan ice crystal rollback investigation and preparations leading to inaugural ice crystal engine test at NASA PSL-3 test facility. *6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference (16–20 June 2014; Atlanta, GA)*. DOI: 10.2514/6.2014-2895
6. Kalyulin S.L., Sazhenkov N.A., Modorskii V.Y., Vladimirov N.V. Numerical simulation of gas-dynamic and strength characteristics of a fan for the experimental test rig for investigation of ice breakdown on rotating working blades. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 1, pp. 134–141. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.13.
7. Gulimovskii I.A., Greben'kov S.A. Applying a modified surface mesh wrapping method for numerical simulation of icing processes. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.34759/vst-2020-2-29-36
8. Chauvin R., Bennani L., Trontin P., Villedieu P. An implicit time marching Galerkin method for the simulation of icing phenomena with a triple layer model. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2018, vol. 150, pp. 20–33. DOI: 10.1016/j.finel.2018.07.003
9. Koshelev K.B., Mel'nikova V.G., Strizhak S.V. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniya RAN*, 2020, vol. 32, no. 4, pp. 217–234. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-16
10. Bayeux C., Radenac E., Villedieu P. Theory and Validation of a 2D Finite-Volume Integral Boundary-Layer Method for Icing Applications. *AIAA Journal*, 2018, vol. 57, no. 3. DOI: 10.2514/1.J057461
11. Alekseenko S.V., Prikhod'ko A.A. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2013, vol. 44, no. 6, pp. 25–57.
12. Belousov I.Y., Kornushenko A.V., Kudryavtsev O.V., Pavlenko O.V., Reslan M.G., Kinsa S.B. The airscrew effect on the aerodynamic characteristics and hinge moments of the deflected wing system under icing conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 7–21. DOI: 10.34759/vst-2022-4-7-21
13. Pavlenko O.V., Pigusov E.A. Application specifics of tangential jet blow-out on the aircraft wing surface in icing conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 7–15. DOI: 10.34759/vst-2020-2-7-15
14. Moiseev V.S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami* (Applied theory of control of unmanned aerial vehicles), Kazan, Respublikanskii tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya, 2013, 768 p.
15. Gorbunov A.A., Galimov A.F. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii*, 2016, no. 1, pp. 7–15.
16. Klemenkov G.P., Prikhod'ko Yu.M., Puzyrev L.N. et al. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2008, vol. 15, no. 4, pp. 564–572.
17. Rogozin E.A., Bokova O.I., Mel'nikov A.V. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*, 2019, no. 3, pp. 21–33.
18. Reznikov S.B., Averin S.V., Kharchenko I.A., Tret'yak V.I., Konyakhin S.F. Multiphase pulse transducer for aircraft anti-ice vibrator feeding. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 139–145.
19. Zhigulin I.E., Emel'yanenko K.A., Sataeva N.E. Studying ultrasonic oscillations impact on the surface roughness at the electrical discharge machining. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 200–212. DOI: 10.34759/vst-2021-1-200-212
20. Ezrokhi Y.A., Kadzharduzov P.A. Working process mathematical modelling of aircraft gas turbine engine in condition of elements icing of its air-gas channel. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 123–133. DOI: 10.34759/vst-2019-4-123-133

Статья поступила в редакцию 08.08.2023; одобрена после рецензирования 18.09.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted on 08.08.2023; approved after reviewing on 18.09.2023; accepted for publication on 18.09.2023.