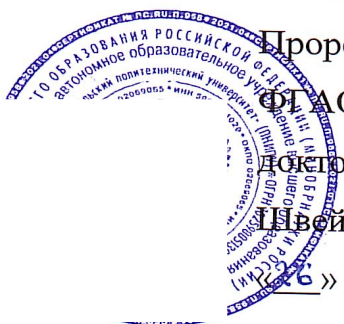


УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке

ФГАОУ ВО «ПНИПУ»

доктор физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

мая

2023 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Диссертация Калюлина Станислава Львовича «Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях» выполнена в Центре высокопроизводительных вычислительных систем ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Калюлин С.Л. работал в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» в Центре высокопроизводительных вычислительных систем в должности инженера, на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» в должности старшего преподавателя.

В 2014 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 150502.65 Конструирование и производство изделий из композиционных материалов (очная форма обучения).

В 2018 году окончил аспирантуру очной формы обучения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника» (период обучения 01.09.2014 – 12.07.2018).

Научный руководитель – Модорский Владимир Яковлевич, доктор технических наук, доцент, директор Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ, декан аэрокосмического факультета ПНИПУ.

**По итогам рассмотрения принять следующее заключение:**

#### **1. Соответствие диссертации заявленной специальности**

Диссертационная работа Калюлина С.Л. соответствует технической отрасли науки и пунктам 8. «Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях», 13. «Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, стадий и этапов их жизненного цикла (создания, производства, эксплуатации и утилизации)» и 23. «Разработка методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах» паспорта специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

**2. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации**

Направление расчетно-экспериментальных исследований задавалось научным руководителем, доктором технических наук, профессором Модорским Владимиром Яковлевичем. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности, а именно:

- проведен литературный обзор по вопросам обледенения элементов конструкции авиационных двигателей при вибрациях;

- подготовлены и проведены вычислительные эксперименты процессов обледенения без вибраций и при вибрациях;

- описаны механизмы образования льда при вибрациях для различных отношений скорости набегающего потока к виброскорости аэродинамического профиля;

- спроектирована модельная климатическая аэродинамическая труба (МКАДТ) для исследования процессов обледенения при вибрациях;

- проведены физические эксперименты на МКАДТ, верификация результатов;

- разработаны методики численного моделирования процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры газа, угла атаки, влажности потока, экспозиции в газодинамическом потоке без вибраций и с учетом вибраций.

### **3. Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Экспериментальные и численные результаты без учета вибраций, представленные в работе, верифицированы с данными физических и численных экспериментов других исследователей, а также с данными технического отчета NASA.

Численное моделирование реализовано на базе лицензионного программного обеспечения FENSAP ICE 3D. Результаты с учетом вибраций

конструкций верифицированы на созданной модельной климатической аэродинамической трубе.

#### **4. Научная новизна диссертационной работы**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

– в ходе математического моделирования процессов обледенения выявлено нелинейное влияние вибраций на обледенение конструкции аэродинамического профиля с учетом набегающего газодинамического потока в диапазоне частот от 30 Гц до 60 кГц;

– описаны механизмы обледенения аэродинамического профиля в диапазоне отношений скорости набегающего потока к виброскорости от 0,82 до 13,7;

– выявлено, что при равенстве скорости набегающего потока и виброскорости профиля может происходить увеличение массы льда в 1,6 раза;

– получены зависимости массы и формы льда от отношения скорости набегающего потока к виброскорости передней кромки модельного воздухозаборника. Обнаружено подобие формы и массы льда в широком диапазоне скоростей набегающего потока.

#### **5. Практическая значимость диссертационной работы**

Практическая значимость диссертации состоит в следующем:

– спроектирована и создана модельная климатическая аэродинамическая труба ( $P < 2$  кВт) для исследования процессов обледенения при вибрациях;

– разработаны методики численного моделирования процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры газа, угла атаки, влажности потока, экспозиции в газодинамическом потоке без вибраций и с учетом вибраций;

– результаты исследований использованы при разработке климатической аэродинамической трубы с рабочей частью 300x500x1000 мм до 0,8 числа Маха с

диапазоном температур от -30 до 30 °С в рамках серии НИОКР с АО «ОДК Авиадвигатель» (г. Пермь);

– результаты исследований использованы при моделировании работы тепловой противообледенительной системы нагрева матов в многослойном носке воздухозаборника авиационного двигателя серии ПД в рамках серии НИОКР с АО «ОДК Авиадвигатель» (г. Пермь) и АО «ОКБ «Аэрокосмические системы» (г. Дубна).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ в учебной дисциплине «Вычислительная гидрогазодинамика» (акт внедрения от 13.02.2023 г.), использованы при выполнении грантов РФФИ №17-47-590017 «Ресурсосберегающая технологическая платформа для экспериментальных и вычислительных исследований процессов обледенения при вибрациях в авиационной технике на базе СуперЭВМ», РФФИ №20-47-596003 «Моделирование процессов поведения ледяного покрова на газопроницаемых деформируемых поверхностях воздухоочистительных устройств газоперекачивающих агрегатов на базе высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ», РФФИ №22-19-20118 «Расчетно-экспериментальное исследование вибраций вентилятора авиационного двигателя при обледенении», шести договоров НИОКР с АО «ОДК Авиадвигатель» и АО «ОКБ «Аэрокосмические системы».

## **6. Ценность научных работ соискателя ученой степени**

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования по моделированию процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях позволяют учесть и, при необходимости, изменить диапазон собственных и вынужденных частот элементов конструкции авиационных двигателей. Разработанная методика численного моделирования процесса

обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры газа, угла атаки профиля, водности потока, экспозиции в газодинамическом потоке и с учетом вибраций, отличается от известных тем, что учитывает вертикальные колебания конструкции в набегающем газодинамическом потоке при обледенении.

#### **7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени**

По теме диссертационного исследования опубликовано 16 работ, включая 5 научных статей, входящих в перечень ВАК и 8 научных статей, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 1 монография. Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем. В 16 работах вклад соискателя является определяющим и составляет от 70 до 90% при выполнении исследований. Во всех работах соискатель непосредственно участвовал в подготовке текста и организации публикации. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах в диссертации отсутствуют.

Основные работы, в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и в изданиях, приравненных к ним:

1. Калюлин, С.Л. Численное моделирование обледенения при вибрациях аэродинамического профиля / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 100–110. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.08. (входит в перечень ВАК)

*В работе представлены результаты проведенного Калюлиным С.Л. численного моделирования обледенения аэродинамического профиля с учетом его вибрации по гармоническому закону, описаны механизмы обледенения при различных отношениях скорости набегающего газодинамического потока к*

*виброскорости аэродинамического профиля, выявлено нелинейное влияние вибраций на обледенение.*

2. 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. (входит в перечень ВАК, базу данных Scopus)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты трехмерных газодинамических и прочностных расчётов вентилятора, зависимости степени повышения давления и потребляемой мощности от величины массового расхода воздуха для различного количества рабочих лопаток.*

3. Модорский, В.Я. Влияние некоторых параметров экспериментального противообледенительного комплекса «ФИЛЬТР» на эффективность защиты энергетических установок от снега / В.Я. Модорский, Д.С. Максимов, И.Е. Черепанов, А.О. Микрюков, С.Л. Калюлин, М.А. Серегина, А.В. Бабушкина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 100–109. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.11. (входит в перечень ВАК)

*В работе представлены результаты проведенных Калюлиным С.Л. физических экспериментов по нарастанию и сбросу ледяной корки на различные типы газопроницаемых деформируемых поверхностей при различных давлениях воздушной струи и скорости набегающего потока.*

4. Maksimov D.S. et al. Developing cyber infrastructure and a model climatic wind tunnel based on the PNRPU high-performance computational complex // Communications in Computer and Information Science. 2020. V. 2163. P. 336–350. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5\_24. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлен разработанный Калюлиным С.Л. алгоритм обмена данными с высокопроизводительным вычислительным комплексом.*

5. Kalyulin S.L. et al. Optimizing numerical design of a multi-mode aero-cooled climatic wind tunnel nozzle on a PNRPU high-performance computational complex // Communications in Computer and Information Science. 2020. V. 2163. P. 305–320. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5\_22. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты численных оптимизационных экспериментов по нахождению оптимальной геометрии сопла с точки зрения минимальных потерь полного давления, минимальной неравномерности потока, минимального осаждения льда на стенках сопла для климатической аэродинамической трубы.*

6. Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Cherepanov I.E. Numerical modeling of the influence of the gas-hydrodynamic flow parameters on streamlined surface icing // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2027. No. 1. Art. 030180. DOI: 10.1063/1.5065274. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты численных расчетов процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры воздуха, угла атаки аэродинамического профиля, влажности потока, экспозиции в потоке без вибраций. Калюлиным С.Л. приведена математическая модель, учитывающая прямое моделирование контуров ледяных наростов, образовавшихся вследствие ударов капель о профиль крыла, процессы аккреции и сублимации льда, испарение жидкой пленки, перенос жидкости по поверхности профиля. Представлена проведенная Калюлиным С.Л. верификация численного эксперимента с данными технического отчета NASA.*

7. Kalyulin S.L. et al. Computational and experimental modeling of icing processes by means of PNRPU high-performance computational complex // Journal of Physics: Conference Series. 2018. – V. 1096. No. 1. Art. 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012081. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)



*В работе представлена разработанная Калюлиным С.Л. схема модельной малогабаритной климатической аэродинамической трубы, результаты проведенных численных расчетов газодинамического поведения потока в установке, сформулированы технические требования к экспериментальной установке, представлены результаты тестовых экспериментов.*

8. Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Maksimov D.S. Physical modeling of the influence of the gas-hydrodynamic flow parameters on the streamlined surface icing with vibrations // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2027. No. 1. Art. 040090. DOI: 10.1063/1.5065364. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты физических экспериментов по обледенению аэродинамического профиля в модельной малогабаритной климатической аэродинамической трубе. Представлена проведенная Калюлиным С.Л. верификация физического эксперимента с данными технического отчета NASA.*

9. Kalyulin S.L. et al. Optimization of drop characteristics in a carrier cooled gas stream using ANSYS and Globalizer software systems on the PNRPU high-performance cluster // Communications in Computer and Information Science. 2017. V. 753. P. 331–345. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5\_24. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлена выявленная Калюлиным С.Л. в результате решения задачи оптимизации область сочетания параметров скоростей и температур капли, а так же скоростей воздушного потока, при которых температура газодинамического потока в рабочей части стремится к максимуму.*

10. Калюлин, С.Л. Интеграция программных комплексов Globalizer и ANSYS для оптимизации процессов охлаждения капли в потоке газа / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, К.А. Баркалов, В.П. Гергель, Ю.А. Лаптева, Е.А. Козин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 145–148. DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-145-148. (входит в перечень ВАК)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты оптимизационных трехмерных расчетов полета капли от впрыска до рабочей части малогабаритной климатической аэродинамической трубы. Калюлиным С.Л. выявлен широкий спектр сочетания параметров, который позволяет выдерживать с достаточной для инженерной практики точностью ( $\pm 1$  °C).*

11. Калюлин, С.Л. Численное моделирование газодинамического потока в замкнутой малогабаритной аэродинамической трубе / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, Р.В. Бульбович // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 192–195. (входит в перечень ВАК)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты численного моделирования газодинамического потока в замкнутой климатической аэродинамической трубе.*

12. Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Paduchev A.P. Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1770. No. 1. Art. 030110. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5\_23. (входит в базы данных Web of Science, Scopus)

*В работе представлены полученные Калюлиным С.Л. результаты численного моделирования газодинамического потока в замкнутой климатической аэродинамической трубе переменного сечения с установленными спрямляющими решетками.*

Прочие публикации:

13. Калюлин, С.Л. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения с использованием высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – Пермь : Издат. ПНИПУ, 2022. – С. 91–93.

14. Моделирование влияния вибраций на обледенение конструкции на базе малогабаритной климатической аэродинамической трубы и

высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ : монография / В.Я. Модорский, С.Л. Калюлин, Д.С. Максимов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – 116 с.

15. Калюлин, С.Л. Создание модельной малогабаритной климатической аэродинамической трубы для исследования процессов обледенения / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, Д.К. Шкретов, И.Е. Черепанов, Д.Н. Хроликова // Модели и методы аэродинамики / Рос. акад. наук, Центр. аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковского. – Москва : Издат. отд. ЦАГИ, 2018. – С. 83–84.

16. Калюлин, С.Л. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения с использованием высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ / С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский // Информационные технологии и нанотехнологии. – Самара : Новая техника, 2018. – С. 2207–2216.

#### **8. Отсутствие заимствований без ссылок на автора и источник заимствования материалов или отдельных результатов**

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Текст диссертации не содержит результаты научных работ без соответствующих ссылок на авторство.

#### **9. Диссертация Калюлина Станислава Львовича отвечает требованиям Положения о присуждения ученых степеней Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в редакции от 26.09.2022 г.), предъявляемом к кандидатским диссертациям.**

Учитывая новизну полученных результатов, возможность практического применения и дальнейшего развития методики, принимая во внимание научную зрелость диссертанта и его высокую квалификацию, диссертация «Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов

авиационных двигателей при вибрациях» Калюлина Станислава Львовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Заключение принято на совместном заседании Центра высокопроизводительных вычислительных систем, кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» и кафедры «Авиационные двигатели» ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

В голосовании приняли участие 19 человек. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0, «воздержалось» – 0, протокол № 1 от 23.05.2023 г.

Председатель заседания,  
зав. кафедрой «Ракетно-  
космическая техника и  
энергетические системы»  
д-р техн. наук, проф.

/ М.И. Соколовский /

Директор Центра  
высокопроизводительных  
вычислительных систем,  
декан аэрокосмического  
факультета, д-р техн. наук, доцент

/ В.Я. Модорский /

Зам. зав. кафедрой  
«Авиационные двигатели»  
канд. техн. наук

/ А.И. Плотников /

Секретарь заседания

/ М.А. Серегина /