

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, водности 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 (± 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 /