

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке
и цифровому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
гор. экономических наук, профессор

Дроговоз Павел Анатольевич

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

на диссертацию Калюлина Станислава Львовича
«Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения
элементов авиационных двигателей при вибрациях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов.

1. Актуальность диссертационной работы

Возрождение в России производства авиационных двигателей для гражданской авиации требует решения широкого круга задач, в том числе создания современных противообледенительных систем, и требует глубоких научных исследований, которым и посвящена данная диссертационная работа.

В настоящее время в авиационной отрасли сложилась ситуация, когда, с одной стороны, имеется тенденция к ужесточению требований к безопасности полетов в условиях обледенения и расширению перечень условий негативного воздействия, а с другой стороны – повышаются требования к экономичности и экологическим характеристикам авиационных двигателей. Данные требования являются в определенной степени взаимоисключающими, и для удовлетворения

современным требованиям как безопасности полетов в условиях обледенения, так и минимального уровня воздействия на работу авиационного двигателя требуется создание инновационных энергоэффективных систем защиты от обледенения.

Моделирование образования ледяных наростов и предотвращение образования наледи на элементах конструкций авиационной техники является сложной междисциплинарной научно-технической задачей. Для получения высококачественного конечного решения необходимо получить с достаточной точностью решения аэродинамических и гидравлических задач по расчету течений воздуха с до- и сверхзвуковыми скоростями, сопряженного теплообмена, фазовых переходов, а также задач по расчету взаимодействия деформируемой конструкции с многофазным потоком.

Одной из эффективных технологий защиты от обледенения является удаление льда с защищаемой поверхности при помощи вибраций. Данное направление представляется более перспективным по сравнению с плавлением льда по причине значительно меньших энергетических затрат.

Для исследования условий возникновения и процессов формирования ледяных наростов, а также их разрушения в результате действия набегающего потока и вибраций соискателем разработаны эффективные методы физического и математического моделирования.

В связи с этим диссертационная работа Калюлина Станислава Львовича, несомненно, является актуальной и значимой, поскольку она направлена на изучение механизмов и определение количественных зависимостей параметров обледенения элементов авиационных двигателей от характеристик вибраций, содержит описание подходов и результаты вычислительных экспериментов по моделированию процессов обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры воздуха, угла атаки аэродинамического профиля, водности потока, экспозиции в потоке без вибраций и с учетом вибраций.

2. Научная новизна

Калюлиным Станиславом Львовичем в ходе математического моделирования процессов обледенения выявлено нелинейное влияние вибраций на обледенение конструкции аэродинамического профиля с учетом набегающего 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. Также установлено, что при равенстве скорости набегающего потока и виброскорости профиля может происходить значительное 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.

Данные результаты являются новыми, а с учетом сложности и многодисциплинарности постановки и большого разнообразия используемых методов исследования – от физического эксперимента до методов математического моделирования с использованием современной вычислительной техники – наличие в диссертационной работы научной новизны, как в смысле полученных результатов, так и в плане методов исследований, не подлежит сомнению.

3. Практическая значимость

Важнейшим результатом диссертационной работы является созданная соискателем и доведенная до возможности практической эксплуатации модельная климатическая аэродинамическая труба ($P < 2$ кВт), предназначенная для исследования процессов обледенения в условиях вибрации. Также разработаны подходы к выполнению вычислительных экспериментов при моделировании процесса обледенения с учетом непостоянства скорости,

давления, температуры газа, угла атаки профиля, водности потока, экспозиции в потоке без вибраций и с учетом вибраций. Соответствующие методики могут быть использованы для решения широкого круга как научно-исследовательских, так и практических задач.

Автором получен акт о внедрении методологии моделирования обледенения воздухозаборника авиационного двигателя с противообледенительной системой на ведущем предприятии отрасли – АО «ОДК-Авиадвигатель», что подтверждает практическую значимость полученных автором результатов.

Результаты диссертационной работы также внедрены в учебный процесс на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ПНИПУ в рамках учебной дисциплины «Вычислительная гидрогазодинамика» (акт внедрения ПНИПУ от 13.02.2023 г.).

4. Мнение о работе в целом

Диссертационная работа изложена ясным техническим языком и воспринимается как единое и цельное исследование. Стил ь изложения материала указывает на высокую квалификацию автора, его доскональное знание и глубокое понимание всех аспектов исследования. Структура диссертации логична и дает полное представление о ходе выполненной работы. Представленный в начале работы обзор современных исследований и действующих климатических аэродинамических труб показывает хорошее знание автором актуального положения дел. Из приведенных в тексте промежуточных и окончательных результатов ясно следует, что диссертантом выполнен весьма значительный объем расчетных и экспериментальных исследований. В то же время выбран наиболее подходящий способ изложения – без не слишком нужных мелких подробностей, но и не опуская никаких существенных деталей.

Результаты экспериментальных исследований и вычислительных экспериментов без учета вибраций, представленные в работе, верифицированы по данным физических и численных экспериментов других исследователей, в т.ч. выполненных в NASA. Результаты математического моделирования получены с использованием лицензионного программного обеспечения FENSAP ICE 3D. Результаты, относящиеся к режимам с вибраций конструкций, верифицированы по данным экспериментальных исследований, выполненных в созданной модельной климатической аэродинамической трубе. Все это подтверждает достоверность представленных данных и обеспечивает высокую степень доверия к полученным результатам.

Разработанный подход к численному моделированию процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры газа, угла атаки профиля, влажности потока, экспозиции в газодинамическом потоке с учетом вибраций, отличается от ранее известных тем, что учитывает вертикальные колебания конструкции в набегающем газодинамическом потоке при образовании обледенения.

Результаты диссертации имеют научную и практическую ценность, являются значимыми для авиадвигателестроительной и смежных отраслей.

Работа прошла достаточную апробацию на восьми международных и трех всероссийских научных конференциях: в Москве, Новосибирске, Перми, Казани, Самаре, Санкт-Петербурге, Евпатории.

Содержание автореферата верно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Выносимые на защиту положения и результаты с достаточной полнотой отражены в 16 научных публикациях, включая 8 научных статей в изданиях, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science, и 5 научных статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

5. Соответствие диссертации выбранной специальности

Диссертационная работа Калюлина Станислава Львовича в полной мере соответствует научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, а именно:

– п. 8. Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях;

– п. 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);

– п. 23. Разработка методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Разработанная автором методика моделирования процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры газа, угла атаки профиля, влажности потока, экспозиции в газодинамическом потоке с учетом вибраций, отличающаяся от известных учетом вертикальных колебаний конструкции в набегающем потоке в условиях обледенения, может быть использована при разработке электротепловых, воздушно-тепловых и электроимпульсных противообледенительных систем.

Полученные и представленные в диссертации результаты имеют очевидную и практическую ценность; могут быть использованы главным образом в авиадвигателестроении. Разработанные подходы к выполнению

экспериментов и введенное в строй оборудование, а также предложенные методы математического моделирования могут быть полезны в смежных отраслях, к примеру, в высотном строительстве, мостостроении и т.п.

7. Замечания по работе

1. В представленной в Главе 2 математической постановке задачи при записи основных уравнений присутствуют некоторые небрежности; также не представлены граничные условия, удачное или неудачное задание которых может существенно сказываться на получаемом решении. Не вполне понятна приведенная на стр. 40 фраза «Геометрически условие “вход” моделируется скругленным для снижения скошенности сеточной модели». Также было бы полезно привести, хотя бы кратко, описание метода, который использовался при численном анализе математической модели.

2. При изучении влияние скорости потока и давления на характеристики образующейся наледи установлены существенно нелинейные зависимости (рис. 3.5, 3.8), весьма подробно описанные в поясняющем тексте. В то же время в выводах по главе (стр. 87) сказано, что влияние этих параметров несущественно.

3. Рисунок 4.7 был бы информативнее, если бы на нем была также представлена полученная автором в эксперименте в климатической аэродинамической трубе форма наледи. Кроме того, вызывает интерес вопрос воспроизводимости натурального эксперимента и идентификации параметров течения в аэродинамической трубе, в частности, степени турбулентности набегающего потока (данный параметр в работе не упоминается, хотя представляется, что его влияние может быть существенным).

Сделанные замечания не являются существенными и ни в какой мере не снижают общую высокую оценку выполненной работы.

8. Заключение

Диссертационная работа **Калюлина Станислава Львовича** «Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях», выполненная в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных соискателем расчетно-экспериментальных исследований определены механизмы и количественные зависимости параметров обледенения элементов авиационных двигателей от характеристик вибраций, выявлены значимые факторы, влияющие на процесс обледенения аэродинамического профиля при вибрациях. Разработаны методики численного моделирования процесса обледенения с учетом изменения скорости, давления, температуры воздуха, угла атаки аэродинамического профиля, влажности потока, экспозиции в потоке без вибраций и с учетом вибраций, при этом методология моделирования обледенения воздухозаборника авиационного двигателя с противообледенительной системой внедрена на авиадвигателестроительном предприятии.

Работа выполнена на высоком научном, методическом и техническом уровне с использованием современных средств и методов исследований, основные выводы обоснованы и подтверждены результатами экспериментов в созданной автором модельной климатической аэродинамической трубе, а также сопоставлением с численными и натурными результатами NASA.

Диссертация Калюлина Станислава Львовича соответствует требованиям «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также требованиям Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ №4334В

от 9 декабря 2021 г., и ее автор Калюлин Станислав Львович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа рассмотрена на заседании кафедры «Прикладная математика», протокол № 8 от 31 августа 2023 г.

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доктор технических наук,
профессор

Кувыркин
Георгий Николаевич

Профессор кафедры «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доктор физико-математических наук,
доцент

Марчевский
Илья Константинович

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
Тел. +7 (499) 263-66-07
E-mail: bauman@bmstu.ru
URL: <https://bmstu.ru>