

Заместителю председателя  
диссертационного совета  
Д ПНИПУ.05.18 в федеральном  
государственном автономном  
образовательном учреждении  
высшего образования «Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет»  
д-ру техн. наук В.В. Карманову  
614990, г. Пермь, Комсомольский  
проспект, д. 29

### ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Косинова Александра Дмитриевича на диссертационную работу Калюлина Станислава Львовича «Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа Калюлина Станислава Львовича посвящена моделированию и прогнозированию режимов обледенения некоторых технических элементов и устройств при воздействии на них обводненных низкоскоростных потоков. Для исследования обледенения автором рассмотрены различные условия обтекания моделей по давлению и температуре, а также вибрациям поверхности. **Актуальность темы диссертации** не вызывает сомнения несмотря на то, что вопросам обледенения уделяется много внимания исследователями во всём мире и достаточно давно. Автор работы определил своё место в ряду этих работ и получил **новые результаты**. Строго говоря, область их применимости ограничена – это элементы авиационных двигателей. В работе вопросы обледенения рассматриваются в рамках расчетно-экспериментального подхода, при котором возможна верификация результатов расчёта в эксперименте и усовершенствование методов при численном моделировании.

По содержанию диссертация Калюлина С.Л. состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Её объем – 121 страница м/п текста, включая иллюстрации и таблицы. Список литературы составлен из 139 наименований. Работа написана ясно и имеет индивидуальный стиль изложения.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень разработанности темы, цель и задачи исследования, отмечена достоверность результатов.

**В первой главе** сделан достаточно обширный обзор литературы, включающий отечественные и зарубежные публикации по проблеме обледенения в разных условиях, сделан критический анализ существующих программных комплексов для инженерных оценок результатов по обледенению.

**Во второй главе** автором описаны принятые для постановки и проведения расчётов допущения и сама математическая модель. Она учитывает динамику механизма обледенения при движении аэродинамического профиля одновременно с движением набегающего газодинамического потока и реализована в 5 этапов. Здесь же предложен алгоритм, при котором для учета вибрации аэродинамического профиля вся сеточная модель движется жестко как единое целое, что позволило в расчётах не перестраивать сеточную модель при колебаниях аэродинамического профиля. Выбор метода решения задачи автор обосновал кратко, но осознанно. Представил план проведения вычислительных экспериментов, геометрическую и сеточную модель для расчётов, выполнил оценку сходимости. Отмечено, что моделирование проводилось методом конечных объемов по стандартной программе, в которой реализована возможность учета гармонических вибраций модели при обледенении.

**В третьей главе** проведено численное моделирование процесса обледенения при вибрациях и выполнен анализ полученных результатов.

Автором сделано предположение, что проведение физических экспериментов по обледенению допустимо на низкоскоростных аэродинамических трубах небольшой мощности. Такое предположение вполне обосновано поскольку по форме льда и его массе имеется подобие, а обледенение слабо зависит от давления воздуха в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Отмечено, что масса льда в условиях разрежения потока больше примерно на 20%, чем при атмосферном давлении. Результаты, полученные в данной главе, имеют важное методическое и практическое значение. На основании расчётов автор фактически приходит к выводу, что для поисковых работ по обледенению можно существенно снижать металлоемкость создаваемых конструкций аэродинамических труб.

Приобретенные знания, сделанный задел и полученные в третьей главе результаты в полной мере используются автором **в четвертой главе** диссертации. В ней описана модельная климатическая аэродинамическая труба, созданная в ходе данной работы. Она не обладает выдающимися характеристиками потока по скорости (до 15 м/с) и имеет компактный размер, который позволяет размещать её в обычной комнате. При этом автору удалось сравнить полученные в ней результаты с данными экспериментов NASA для скорости 129 м/с. Согласование результатов при сравнении оказалось вполне приемлемое. Отмечается, что соблюдение известного из литературы /77/ критерия обеспечивает подобие траекторий капель и формы обледенения модели и натуры при движении набегающего потока относительно аэродинамического профиля. Таким образом методика численного моделирования процесса обледенения с учетом актуальных для данной работы условий автором диссертации отработана в полной мере.

**Основные выводы** диссертации вполне обоснованы и не вызывают сомнения в их достоверности. Имеется согласие результатов данной работы с

экспериментальными и численными результатами, полученными другими авторами.

### **Степень достоверности результатов, научная новизна**

Для экспериментальных и численных результатов без учета вибраций выполнено сравнение с данными физических и численных экспериментов других исследователей, в т.ч. американскими из NASA. Численное моделирование реализовано на базе лицензионного программного обеспечения FENSAP ICE 3D. Результаты с учетом вибраций конструкций верифицированы на созданной модельной климатической аэродинамической трубе.

Полученные в диссертации научные результаты обладают достаточной степенью научной новизны:

– Впервые 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;

– Впервые 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.

Таким образом, диссертацию Калюлина Станислава Львовича можно характеризовать как законченное исследование, несомненно, имеющее научную и практическую ценность. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных трудах, включая 8 научных статей, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science и 5 научных статей, входящие в перечень ВАК, доложены на значимых конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе**

К работе (в основном по её оформлению) имеются замечания.

1. На страницах 8 (снизу) и 10 (в середине) имеется повторение пункта «Методология и методы исследований».

2. На странице 23 при анализе результатов работы /35/ допущена опечатка. В этой работе речь идет о системе антиобледенения, а не обледенения.

3. Имеется повтор текста на страницах 29, 30 и 32, где речь идет про модель Спаларта-Аллмараса.

4. На странице 35 говорится о гипотезе, но сама она не сформулирована.

5. Пропущено значение энергопотребления в выводе 8 на странице 104, либо лишним является союз «что». Такое же замечание к автореферату (вывод 8).

6. В выводах на страницах 103 и 104 имеется 11 пунктов. Они основные и их должно быть раза в два меньше по числу.

Упомянутые выше замечания по тексту диссертации не являются принципиальными и не влияют на восприятие и оценку работы.

Автореферат диссертации содержит информацию об основных результатах работы. Он отражает содержание диссертации. Научные положения, выводы и рекомендации вполне обоснованы автором.

В заключении отмечу, что диссертация Калюлина Станислава Львовича «Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях» соответствует паспорту 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) и п. 23. Разработка методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах.

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. Её автор, Калюлин Станислав Львович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Главный научный сотрудник,  
заведующий лабораторией волновых  
процессов в сверхзвуковых течениях  
федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт теоретической и  
прикладной механики им. С.А.  
Христиановича Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
старший научный сотрудник,  
доктор физико-математических наук

Косинов  
Александр Дмитриевич

Контактные данные:

Косинов Александр Дмитриевич, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией волновых процессов в сверхзвуковых течениях федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и

прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения  
Российской академии наук

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Телефон: +7 (913) 919-39-75

E-mail: [kosinov@itam.nsc.ru](mailto:kosinov@itam.nsc.ru) .

« 8 » сентября 2023 г.

Подпись Косинова А.Д. удостоверяю.

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН

к.ф.-м.н.

« 8 » сентября 2023 г.

Ю.В. Кратова

