

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу СИДХУ Джуниор Саржит Сингх «Волновое сопротивление каналов сложных форм с ромбической рельефной структурой поверхности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа посвящена совершенствованию методики расчёта двухконтурных сопел двигателей первых ступеней ракет-носителей, состоящих из земного сопла и высотного круглого насадка с целью улучшения их тяговых характеристик. Для отдельных вариантов конструктивного оформления сопловых насадков характерна абляция, при которой на композитных стенках образуются структуры перемежающихся выступов и впадин, похожие на ромбические рельефы. В настоящее время строгая нелинейная теория обтекания рельефных стенок и их волнового сопротивления отсутствует, поэтому разработка математических моделей различного уровня сложности подобных сопел является актуальной задачей для ракетной техники.

**Диссертация состоит** из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён обзор результатов исследований обтекания рельефных поверхностей головных частей летательных аппаратов. Показана связь между геометрией рельефной поверхности и давлением потока, а также изменением шага рельефной сетки и поверхностным трением. Рассмотрены различные подходы к составлению математических моделей стационарного обтекания рельефных поверхностей на основе краевых задач и методов их аналитического решения.

Во второй главе с помощью линейной теории плоских течений получена в случае кусочно-гладких периодических плоских рельефов, имеющих переднюю

и заднюю кромки, аналитическая формула, которая описывает зависимость их полных коэффициентов волнового сопротивления от их параметров подобия. Приведены результаты многопараметрического исследования данной формулы в виде двухпараметрических и трехмерных графиков.

В третьей главе обоснован и подробно изложен математически строгий метод решения трехмерной линейной краевой задачи стационарного обтекания однородным потоком газа бесконечных рельефов, заданных суммами плоских синусоидальных волн. Приведено также многопараметрическое исследование, так называемых, критических режимов сверхзвукового обтекания, при которых стационарное поле обтекания изученных ромбических рельефов не определено из-за деления на ноль.

В четвертой главе приведены результаты вычислительного исследования с помощью CFD-продукта ANSYS серии сверхзвуковых течений, возникавших в процессе измерений на газодинамическом стенде волновых сопротивлений сопловых насадков, стенки которых имели ромбические рельефы с разными углами ромба. Приведен сравнительный анализ точечной зависимости силы волнового сопротивления рельефных насадков от их углов ромба, рассчитанной с помощью CFD-продукта ANSYS, и аналогичных экспериментальных данных.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной работы, рекомендации по их использованию и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

**Основные результаты** работы заключаются в том, что:

1. на основе анализа формул для средних углов наклона периодических контуров найден безразмерный параметр, названный дефектом и определяющий согласно формуле Аккерета все допустимые отличия полных коэффициентов волнового сопротивления бесконечных периодических плоских рельефов и их конечных аналогов. Доказано, что дефект всегда является двоякопериодической функцией только двух параметров подобия, а именно: наименьшей дробной части волнового числа и значения безразмерной фазы на передней кромке;
2. точно решена трехмерная линейная краевая задача стационарного обтекания однородным потоком бесконечных ромбических рельефов, заданных суммами плоских синусоидальных волн. Найдены критические режимы сверхзвукового обтекания ромбических рельефов, теоретически изученных в диссертации.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. показано, что интегральная формула Аккерета является точной, не только для гладких, но и для кусочно-гладких контуров, удовлетворяющих ограничениям применимости линейной теории. Теоретически доказано существование особых плоских рельефов, у которых дефект тождественно равен нулю, и которые вследствие своей уникальной технологической простоты изготовления являются главными претендентами на эталоны волновых сопротивлений;
2. получено математически строгое решение стационарной линейной краевой задачи трехмерного обтекания однородным потоком бесконечных ромбических рельефов заданных в виде сумм плоских синусоидальных волн;
3. все предсказанные критические режимы сверхзвукового обтекания ромбических рельефов требуют экспериментального подтверждения.

**Практическую значимость** представляют математически строгие выражения для полей возмущений давления, так как они будут использованы для расчетов локальных коэффициентов волнового сопротивления и последующей оценки потерь тяги высотного насадка, за счет волнового сопротивления его рельефных стенок. Практически значимыми являются также и особые плоские рельефы, так как применение эталонных насадков, имеющих одинаковый особый рельеф, но различные длины, повысит точность измерений на дифференциальной установке.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается известными теоретическими и экспериментальными данными по испытанию пластин с ромбическим рельефом на дифференциальной установке, а также корректным использованием математического аппарата и сертифицированного программного обеспечения ANSYS для решения прикладных задач газовой динамики.

#### **Замечания:**

##### *1) Структура работы.*

Глава 4 диссертации, посвящённая математическому моделированию гидродинамических процессов, слабо связана с Главами 1,2 и 3, где та же проблема решается аналитическими методами.

##### *2) Глава 4*

Точность полученных численных результатов нигде не анализируется, поэтому представление расчётных значений силы волнового сопротивления в таблице

4.4 и 4.6 с пятью–семью значащими цифрами выглядит необоснованным. Это касается и текста диссертации: например, на странице 106 (выводы по главе 4) сказано «При этом наибольшая сила волнового сопротивления приходится при углах ромба  $6^\circ - 13,09944\text{Н} \dots$ ». Значение  $13.1\text{Н}$  в данном контексте выглядит более реалистичным.

### 3) Глава 4

Расхождение между расчётными и экспериментальными данными, показанное на рис. 4.10 и 4.13 не получило должного объяснения. Необходимо проанализировать влияние различий в геометрии ромбических выступов, показанных на рис. 4.11 и 4.12. При сверхзвуковой скорости набегающего потока даже чуть притупленный носик ромба приведёт к заметному росту гидравлического сопротивления. Кроме того, из текста диссертации не ясны характеристики вычислительной сетки во внутренней части турбулентного пограничного слоя. Каковы безразмерные расстояния  $y^+$  узлов сетки? Достигнута ли сходимость по сетке (слабая зависимость получаемых результатов от величины шага сетки)?

### 4) Страница 100

Некоторые расчётные данные приведены без должного анализа полученных результатов. В частности, величина силы волнового сопротивления увеличивается менее чем на 2% при изменении уровня интенсивности турбулентности потока от 3% до 100% (рис. 4.15 и таблица 4.5). Данный факт (т.е. фактически независимость сопротивления от интенсивности турбулентности) в тексте диссертации никак не комментируется.

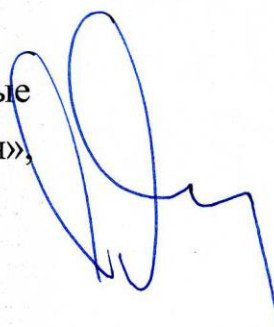
## **Заключение**

Диссертационная работа СИДХУ Джуниор Саржит Сингх является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по расчету волнового сопротивления, возникающего при сверхзвуковом обтекании стенок соплового насадка с ромбическим рельефом, имеющей значение для развития ракетного двигателестроения. Основные результаты, приведенные в диссертации, получены впервые и лично автором. Основные положения диссертации докладывались на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях и опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ или входящих в систему Scopus. Автореферат

диссертации полностью отражает содержание диссертации. Отмеченные выше замечания не снижают общей высокой оценки результатов диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа СИДХУ Джуниор Саржит Сингх «Волновое сопротивление каналов сложных форм с ромбической рельефной структурой поверхности» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», а его автор – СИДХУ Джуниор Саржит Сингх заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Доктор физико-математических наук,  
научный сотрудник отдела «Специальные  
авиационные двигатели и химмотология»,  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»



С.И. Мартыненко

Мартыненко Сергей Иванович  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»  
111116 г. Москва, ул. Авиамоторная, 2.  
[www.ciam.ru](http://www.ciam.ru)  
[Martynenko@ciam.ru](mailto:Martynenko@ciam.ru)  
Тел. (495)-362-40-25

**Подпись С.И. Мартыненко заверяю**

Учёный секретарь  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,  
доктор экономических наук, доцент



Екатерина Викторовна Джамай