

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и цифровому  
развитию МГТУ им. Н.Э. Баумана  
д.э.н., профессор Дрогозов П.А.

« 01 » сентября 2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на диссертационную работу Фофонова Даниила Михайловича «Разработка расчетно-оптимизационных методов механики жидкости, газа и плазмы для аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

#### Актуальность работы

Проблемы, связанные с разработкой моделей механики газовых потоков, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для определения аэродинамической формы/компоновки летательных аппаратов (ЛА), совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы при больших сверхзвуковых скоростях, активно изучаются как в России, так и за рубежом. Актуальность решения этих проблем подчеркивается как неснижающейся активностью научных публикаций, созданием конкретных конструкций для выполнения прикладных исследований, так и разработкой и

обсуждением новых проектов и экспериментальных моделей.

Задача построения оптимальной пространственной формы летательного аппарата как важная часть процесса выбора его аэродинамической компоновки остается актуальной и требующей своего исследования и решения.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 161 страницу, включая 124 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 103 наименования.

Во введении отражена актуальность рассматриваемой проблемы, сформулирована цель работы и кратко отражена структура диссертации.

В первой главе рассматривается приближенный метод расчета аэродинамических характеристик пространственных тел, основанный на локальном методе касательного клина, уточненного по результату единичного расчета обтекания тела идеальным газом. Представлен анализ точности метода, влияния эффектов реального гиперзвукового течения на результаты расчета, приведены зависимости для определения коэффициента трения.

Во второй главе изложен алгоритм метода локальных вариаций для оптимизации формы пространственных тел с целью максимизации аэродинамического качества или минимизации лобового сопротивления. Исследованы единственность и сходимости численного решения, влияние параметров метода касательного клина, математической модели сверхзвукового потока и закона изменения коэффициента трения на поверхности тела на его оптимальную форму.

В третьей главе сформулирована и решена вариационная задача о форме тела максимального аэродинамического качества при заданной площади его донного сечения и постоянном значении коэффициента трения на его поверхности, а также влияние радиуса затупления передней кромки



треугольного крыла на его оптимальную форму.

В четвертой главе изложен метод аэродинамического проектирования и представлены примеры его применения для некоторых моделей ЛА.

В приложении дано описание программного комплекса «Программный комплекс аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов» и инструкция по его применению

В заключении кратко формулируются основные выводы, полученные в диссертации.

### **Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов.**

Наиболее значимыми научными результатами, полученными в диссертационной работе, являются:

1. Разработан приближенный метод расчета аэродинамических характеристик тел с кусочно-гладкой и априори неизвестной поверхностью при больших сверхзвуковых скоростях для применения в численной процедуре метода локальных вариаций. Выполнен анализ точности предложенного метода расчета аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов.

2. На основе численного метода локальных вариаций разработаны алгоритмы оптимизации формы тела с целью достижения максимального аэродинамического качества либо минимального коэффициента сопротивления при задании числа Маха, коэффициента трения, угла атаки и различного рода объемных и геометрических ограничений на его форму.

3. Решена вариационная задача о форме тела максимального аэродинамического качества в сверхзвуковом потоке в рамках локальной модели взаимодействия сверхзвукового потока с поверхностью тела.

4. Создан авторский программный код (комплекс), реализующий разработанные алгоритмы оптимизации.

5. Разработан метод аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов.

6. Представлены результаты аэродинамического проектирования интегральной компоновки планера и силовой установки ЛА; аэродинамической компоновки ЛА при заданных форме и габаритах отсеков размещения оборудования и полезной нагрузки. Разработан численный расчетно-оптимизационный метод механики жидкости, газа и плазмы для аэродинамического проектирования высокоскоростных летательных аппаратов, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы.

#### **Теоретическая значимость**

Разработанный авторский программный код (комплекс) позволяет выполнять аэродинамическое проектирование высокоскоростных летательных аппаратов, совершающих полет в атмосфере с использованием подъемной силы, в широком диапазоне изменения чисел Маха, Рейнольдса, углов атаки при заданной форме в плане с учетом различных конструктивных требований. К таким требованиям могут относиться габаритные размеры силовой установки, полезной нагрузки, объём фюзеляжа, крыла и пр., радиус затупления носка и передних кромок крыла и др.

#### **Практическая значимость**

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в учебном процессе системы высшего образования РФ при чтении курса «Аэродинамики летательных аппаратов», курсовом и дипломном проектировании. Результаты диссертационной работы могут найти применение в конструкторских и научных организациях, осуществляющих проектирование и создание новых образцов ЛА.

**Достоверность** научных положений диссертации подтверждается физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств механики жидкости, газа и плазмы.



Достоверность выводов и заключений подтверждается сравнением собственных численных результатов с расчетами других авторов, а также демонстрацией соответствия численных и аналитических решений.

Диссертация соответствует специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Основные этапы работы, выводы и результаты, представленные в автореферате, в полной мере отражают основные научные результаты и содержание диссертации.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Отсутствуют сведения о пакете CFD, в котором производилось численное моделирование.
2. Нет сравнения с экспериментом хотя бы некоторых полученных результатов.
3. Сравнение с известными методами оптимизации и поиска оптимальных по аэродинамическим характеристикам конфигураций проведено только в рамках сравнения с решением задачи о поиске формы волнолета и с поиском аналитического решения для тонкого треугольного крыла.
4. Сходимость предложенного вариационного метода была исследована только для класса острых треугольных крыльев.
5. Аэродинамические коэффициенты, представленные в работе, обозначены не по ГОСТу.

Отмеченные замечания не снижают актуальность и значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Работа является законченной и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно охарактеризовать как научно-обоснованный систематический анализ важной фундаментальной и прикладной задачи разработки вычислительных моделей

аэротермодинамики совершенного и химически реагирующего газа. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты, написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

По актуальности рассмотренных проблем, научной новизне решенных задач и практической значимости полученных результатов диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор Фофонов Даниил Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Работа и отзыв обсуждены «31» августа 2023 года на научном семинаре кафедры СМЗ «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Протокол №1.

Доцент кафедры «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов», кандидат технических наук, доцент

Луценко  
Александр  
Юрьевич

Подпись Луценко А.Ю. удостоверяю  
Руководитель научно-учебного комплекса  
«Специальное машиностроение»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
доктор технических наук, профессор

Калугин  
Владимир  
Тимофеевич

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

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, строение 1

Тел.: +7 (499) 263-65-12

Адрес электронной почты: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

Официальный сайт: <https://bmstu.ru/>