

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Бочарова Алексея Николаевича
на диссертационную работу Ханхасаевой Яны Владиславовны
«Влияние вложения энергии в поток на трехмерное обтекание
летательных аппаратов»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертационной работе Ханхасаевой Я.В. рассматривается вложение энергии в различные области потока, образующегося при сверхзвуковом обтекании летательных аппаратов различной формы, как средства управления их аэродинамическими характеристиками. Данная задача является весьма актуальной и направлена на решение практической проблемы, связанной с поиском и разработкой новых эффективных решений при проектировании летательных аппаратов. Помимо возможности управлять аэродинамическими характеристиками различных летательных аппаратов, вложение энергии также может контролировать передачу тепла и массоперенос в пограничном слое, снижать поверхностное трение, задерживать или же индуцировать отрыв потока.

Автором выполнены параметрические исследования свойств теплового следа за источником энергии, рассмотрено трехмерное сверхзвуковое обтекание летательных аппаратов при наличии источников энергии в потоке. Показано, что для некоторых вариантов вложение энергии приводит к уменьшению донного сопротивления. Для случая трехмерного обтекания ЛА сложной формы выявлены рациональные варианты расположения, размеров и мощности источников энергии, обеспечивающие снижение сопротивления и повышение аэродинамического качества. Для модели высокоскоростного летательного аппарата определены варианты источника, обеспечивающие повышение аэродинамических характеристик, увеличение расхода и полного давления в воздухозаборнике прямооточного двигателя.

Диссертация включает в себя 107 страниц, 63 рисунка и 12 таблиц. Список литературы состоит из 104 наименований. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. По теме диссертации было опубликовано 9 работ, 7 из которых включены в список ВАК или входят в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science).

Введение посвящено обзору экспериментальных и численных работ, направленных на исследование влияния вложения энергии на обтекание различных летательных аппаратов. В достаточно полном обзоре экспериментальных работ приводятся основные способы дистанционного вложения энергии в сверхзву-

ковой поток: электрический, СВЧ и оптический разряды. В обзоре расчетно-теоретических работ приводится список основных математических моделей, используемых для исследования данной задачи. Отмечается, что, несмотря на большой объем выполненных к настоящему времени работ, многие вопросы требуют дальнейшего исследования. Также во введении приводятся цели, задачи и положения, выносимые на защиту, обосновывается актуальность работы, обсуждается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований.

В первой главе приводится описание используемой математической модели для вязкого теплопроводного газа с учетом вложения энергии в поток на основе нестационарных осредненных по Фавру и Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) с использованием моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса и SST Менгера, включающая источник энергии. Описывается алгоритм расчета сложных течений с учетом вложения энергии. Рассматриваются используемые численные методы. Дискретизация по пространственным переменным производится методом конечных объемов. Для аппроксимации невязкого потока на грани счетной ячейки используется обобщенная схема Годунова с интерполяционными схемами TVD и WENO. Аппроксимация по времени производится как по явной схеме, так и по неявной на основе метода LU-SGS. Верификация и валидация алгоритма проводится сравнением результатов численного решения ряда достаточно представительных тестовых задач (сверхзвуковое обтекание моделей ЛА НВ-2 и Х-43, моделирование развития зоны энергоподвода в покоящейся воздушной среде) с экспериментальными и численными данными других авторов.

Хорошее согласие основных результатов, полученных в данной работе, и результатов других авторов позволяет сделать вывод о высоком качестве разработанной и реализованной численной модели.

Вторая глава посвящена параметрическому исследованию свойств теплового следа за источником энергии. Выполнено исследование численной сходимости. Поле течения можно разделить на две области: область взаимодействия набегающего потока с энерговкладом и область следа. В области взаимодействия в волне сжатия происходит рост давления и плотности, число Маха опускается до дозвуковых значений. В следе за источником плотность, число Маха, полное давление существенно ниже, чем в набегающем потоке. В области ближнего следа газодинамические величины изменяются мало, в области дальнего следа они начинают плавно переходить к своим значениям в набегающем потоке, однако, даже на расстоянии в сотню диаметров области энерговклада их не достигают.

Выявлены основные зависимости параметров следа за энергоисточником от его формы и размеров, мощности вложения энергии, числа Маха набегающего потока. Чем выше мощность источника (при фиксированных размерах источника) и чем выше скорость набегающего потока (при фиксированных размерах и мощности

источника), тем ниже плотность, число Маха и полное давление в следе. Чем меньше поперечная потоку площадь источника (при фиксированной мощности источника), тем ниже плотность, число Маха и полное давление в ближнем следе.

Установленные в данной Главе закономерности течения в следе за зоной энергоподвода позволяют сделать выводы об эффективности энергоподвода перед обтекаемым телом.

В третьей главе проводится численное исследование влияние энерговклада на обтекание модели ЛА (затупленный конус, переходящий в цилиндр) в области перед телом, на боковой поверхности и в области донного среза на структуру течения, аэродинамические характеристики и донное давление. Выявлено, что вложение энергии перед телом приводит к существенному снижению сопротивления, но на величину донного сопротивления влияет незначительно. Энергоподвод на боковой поверхности ведет к уменьшению коэффициента трения, утолщению пограничного слоя вниз по потоку и увеличению донного давления. Для всех вариантов расположения энергоисточника (в донной области) наблюдается снижение сопротивления и повышение донного давления.

В четвертой главе проводится параметрическое исследование влияния энерговложения на обтекание летательного аппарата сложной формы. Рассматриваются влияние таких аспектов течения, как угол атаки набегающего потока, а также мощность и различные варианты расположения источника энергии на аэродинамические характеристики ЛА, а также тепловые потоки к его поверхности. Выявлены рациональные варианты параметров энергоисточника, с точки зрения энергоэффективности, снижения сопротивления и аэродинамического качества. При вложении энергии перед крыльями модели получено незначительное увеличение подъемной силы при небольшом уменьшении суммарного сопротивления модели. В этой же главе исследуется влияние вложения энергии перед носом модели на тепловые потоки при обтекании с заданной температурой поверхности. Тепловой след после обтекания носа концентрируется у боковой поверхности тела, что приводит к заметному росту теплового потока на всей поверхности модели, за исключением областей крыльев, отдаленных от цилиндрической части. След с отдалением от источника постепенно охлаждается. В связи с этим эффект увеличения теплового потока ослабляется с отдалением от носа. При ненулевом угле атаки тепловой поток увеличивается только на носовой части и части подветренной поверхности, близкой к носу, поскольку высокотемпературный след сносится с фюзеляжа.

В пятой главе рассматривается влияние энерговклада на обтекание модели высокоскоростного летательного аппарата (ВЛА), оснащенного прямоточным двигателем на примере ВЛА Х-43. Рассматривалось как вложение энергии перед

носом модели, так и в воздухозаборнике. При вложении энергии перед носом получено уменьшение лобового сопротивления и увеличение расхода двигателя и полного давления на всем протяжении тракта ПВРД. При вложении энергии в канале воздухозаборника увеличивается область отрыва у его входного сечения, ударно-волновая структура за счет созданного энергосложением противодавления смещается к входному сечению, уменьшается давление торможения на входе в двигатель, снижается сопротивление и увеличивается подъемная сила всего аппарата.

Автореферат вполне отражает содержание диссертационной работы.

По результатам рассмотрения диссертации Ханхасаевой Я.В. можно сделать некоторые **замечания**:

1. В работе заявлена разработка математической и численной модели течения с энергоскладом. Обязательным элементом модели является постановка граничных (и, как правило, начальных условий). По-видимому, автором допущено досадное недоразумение: нигде в тексте не обсуждается постановка начальных и граничных условий.

2. Коль скоро в работе речь идет о турбулентных течениях, было бы логично привести какие-либо характеристики турбулентности, например оценки интенсивности турбулентности хотя бы на входных границах. Вообще, было бы интересно сравнить основные аэродинамические характеристики рассмотренных в работе задач с учетом и без учета турбулентности.

3. В данной работе используется самая простая модель источника: равномерная по времени и пространству плотность тепловыделения. В реальности горение разряда чаще всего имеет более сложный характер. Хотелось бы увидеть в работе соображения по поводу других вариантов источника.

4. В разработке математической и численной модели указано, что в работе используются интерполяционные схемы типа TVD и WENO. Если TVD упомянута в 1 Главе, то по поводу WENO схемы не сказано ни слова.


Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация Ханхасаевой Я. В. является актуальной работой, выполненной на высоком научном уровне. Достоверность полученных расчетных данных подтверждается использованием проверенных научных подходов и сравнением с экспериментальными и численными данными других авторов. Полученные автором результаты представляют большой теоретический и практический интерес, в частности, рекомендации о рациональ-

ном расположении источников энергии могут быть использованы при проектировании новых летательных аппаратов.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в публикациях из списка ВАК.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Ханхасаева Яна Владиславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составил официальный оппонент
Бочаров Алексей Николаевич,
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом №21
Объединенного института высоких
температур РАН


Бочаров А.Н.
12.02.24

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
+7 (495) 484-26-38, bocharov@ihed.ras.ru

Подпись Бочарова Алексея Николаевича удостоверяю:

Ученый секретарь Объединенного института высоких температур

Д.ф.-м.н





Киверин А.Д.