

УТВЕРЖДАЮ:



Директор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Аптекарев А.И.

2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Диссертация «Влияние вложения энергии в поток на трехмерное обтекание летательных аппаратов» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Ханхасаева Яна Владиславовна работала в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в отделе №8 в должности младшего научного сотрудника.

В 2012 г. окончила специалитет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Механика». В 2015 г. окончила очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению подготовки 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В 2023 г. сдан кандидатский экзамен по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Луцкий Александр Евгеньевич работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности главного научного сотрудника отдела №8.

По итогам обсуждения диссертации **принято следующее заключение:**

Тема диссертации является актуальной, поскольку для создания новых образцов аэрокосмической техники весьма важен поиск и разработка новых эффективных средств, позволяющих управлять характеристиками газового потока вблизи поверхности летательного аппарата, контролировать передачу тепла и массоперенос в пограничном слое, снижать поверхностное трение, задерживать ламинарно-турбулентный переход,

управлять отрывом потока, уменьшать время воспламенения и управлять процессом горения сверхзвуковых потоков горючего в прямоточном двигателе. В диссертации представлено исследование возможностей и эффективности одного из таких средств, а именно вложения энергии в различные области потока, образующегося при сверхзвуковом обтекании летательных аппаратов различной формы.

Целью диссертационной работы является комплексное исследование влияния вложения энергии в различные области потока на режимы трехмерного обтекания летательных аппаратов сложной формы.

В диссертации решались следующие **задачи**:

- 1) Выбор математической модели трехмерного обтекания летательных аппаратов при наличии источников энергии в потоке, основанной на нестационарных осредненных по Фавру и Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) с использованием моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса (SA) и SST Ментера. Разработка алгоритма расчета сложных течений с учетом вложения энергии.
- 2) Параметрические исследования свойств теплового следа за источником энергии.
- 3) Численное исследование влияния вложения энергии в области перед телом, на боковой поверхности и в области донного среза на обтекание модели: на структуру течения, величину донного давления, аэродинамические характеристики.
- 4) Численное исследование влияния вложения энергии в различные области потока на трехмерное обтекание летательного аппарата (ЛА) сложной формы и структуру течения. Определение влияния угла атаки, параметров и расположения источника энергии на аэродинамические характеристики ЛА, а также тепловые потоки к его поверхности.
- 5) Численное исследование влияние источников энергии в потоке на обтекание модели высокоскоростного ЛА (ВЛА), оснащенного прямоточным воздушно-реактивным двигателем. Определение влияния вложения энергии на характеристики воздухозаборника.

Основные результаты диссертации:

- 1) Разработана методика расчета и проведено параметрическое исследование свойств теплового следа за источником энергии в сверхзвуковом потоке в зависимости от формы и размеров источника, мощности вложения энергии и числа Маха набегающего потока.
- 2) В ходе численных исследований определено влияние вложения энергии перед носовой частью модели на течение в донной области. Для некоторых вариантов источника вложение энергии приводит к увеличению донного давления.
- 3) На основе проведенных исследований выявлены рациональные варианты расположения, размеров и мощности источников энергии, обеспечивающие снижение сопротивления и повышение аэродинамического качества при трехмерном обтекании ЛА сложной формы.
- 4) Проведено численное исследование влияния вложения энергии при обтекании модели ВЛА, на основе которого определены варианты источника, обеспечивающие повышение аэродинамических характеристик, увеличение расхода и полного давления в воздухозаборнике прямоточного двигателя.

Все результаты диссертации получены лично соискателем.

Научная новизна определяется рядом результатов численного моделирования:

- 1) Исследовано влияние энергозложения в область перед телом и в его окрестности на донное течение. Впервые показано, что вложение энергии перед носовой частью объекта не приводит к росту донного сопротивления.
- 2) Впервые проведено комплексное исследование влияния вложения энергии в различных областях потока на трехмерное обтекание летательного аппарата сложной формы. Проведен анализ результатов моделирования и получены рекомендации о рациональном выборе параметров источников энергии при проектировании ЛА различных компоновок.
- 3) Впервые показано, что рациональное расположение источника энергии позволяет увеличить расход и полное давление на входе в воздухозаборник прямооточного двигателя.

Научная значимость и практическая ценность. Традиционным способом улучшения аэродинамических характеристик летательного аппарата является оптимизация его формы. Для некоторых объектов возможности такого подхода в значительной степени исчерпаны. Существуют и альтернативные методы, которые направлены на изменение характеристик газового потока в окрестности поверхности ЛА. Одним из таких способов является вложение энергии в небольшую область перед или в окрестности поверхности ЛА, что за счет перестройки течения позволяет существенно улучшить его аэродинамические характеристики.

Теоретическая значимость работы состоит в исследовании различных явлений существенной перестройки течения в результате относительно малых возмущениях набегающего потока. В практическом плане работа дает рекомендации о рациональном расположении источников энергии при проектировании ЛА различных компоновок. Показано, в частности, что вложение энергии перед носовой частью не приводит к росту донного сопротивления.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием хорошо обоснованных в мировой практике подходов к построению численных алгоритмов, а также результатами компьютерного моделирования ряда задач, для которых проведено сопоставление полученных решений с экспериментальными и расчетными данными.

Материалы диссертации полно представлены в 9 печатных работах, опубликованных соискателем: 7 из них – статьи в изданиях, включенных в список ВАК или индексируемых в международных базах (SCOPUS, Web of Science). На программный комплекс (PULSAR3D++) получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1) Борисов В.Е., Луцкий А.Е., Северин А.В., Ханхасаева Я.В. Активное воздействие на обтекание гиперзвуковых летательных аппаратов // Москва, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 137. С. 1-14.
- 2) Балашов В. А., Борисов В. Е., Ханхасаева Я.В. Неявная схема для уравнений URANS с моделью турбулентности SST на основе метода LU-SGS // Москва, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 31. С. 1-20.

- 3) Кудряшов И.Ю., Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В. Численное исследование влияния вложения энергии в поток на течение в донной области // Матем. моделирование. 2015. Т. 27, №9. С. 33-48.
- 4) Луцкий А.Е., Меньшов И. С., Ханхасаева Я. В. Влияние неоднородности набегающего потока на сверхзвуковое обтекание затупленного тела // Матем. моделирование. 2016. Т. 28, №7. С. 45-55.
- 5) Khankhasaeva Y.V., Borisov V.E., Lutsky A.E. Influence of energy input on the flow past hypersonic aircraft x-43 // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. 815. 012018.
- 6) Khankhasaeva Ya.V., Afendikov A.L., Lutsky A.E., Menshov I.S., Znamenskaya I.A., Simulation and visualisation of supersonic underexpanded jet interaction with a blunt body and periodic energy input // Scientific Visualization, 2021, vol. 13, n. 1, pp 15 – 26.
- 7) Ханхасаева Я.В. Влияние вложения энергии на аэродинамические характеристики и тепловые потоки при трёхмерном обтекании модели летательного аппарата сложной формы // Матем. моделирование. 2023. Т. 35, №2. С.105-125.
- 8) Луцкий А. Е., Ханхасаева Я. В. Трёхмерная задача обтекания модели летательного аппарата при активном воздействии на поток // Математические заметки СВФУ. 2015. Т. 22, № 2.
- 9) Ханхасаева Я.В., Борисов В.Е., Луцкий А.Е. Энергетическое воздействие на обтекание гиперзвуковых летательных аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17, № 4. С. 8.
- 10) Борисов В.Е., Давыдов А.А., Константиновская Т.В., Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В. Программный модуль PULSAR3D++ на основе WENO-реконструкции для математического моделирования аэротермодинамики конструкций высокоскоростных летательных аппаратов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022610600, 13.01.2022. Заявка № 2021682139 от 28.12.2021.

Личный вклад соискателя. Все результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Все численные исследования, представленные в данной работе, были проведены лично автором. Автор подобрал параметры и условия численных экспериментов (выбор и геометрические характеристики обтекаемых моделей, параметры набегающего потока и источников энергии), провел расчеты (тепловой след в сверхзвуковом потоке, сверхзвуковое обтекание различных моделей при наличии источников энергии) и анализ полученных результатов. Соискатель также принимал участие в разработке программного комплекса (PULSAR3D++), с помощью которого проводились численные расчеты.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

- 1) Кудряшов И.Ю., Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В. Численное исследование влияния вложения энергии в поток на течение в донной области // V Международная конференция «Математика, ее приложения и математическое образование», Улан-Удэ, 2014.
- 2) Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В. Влияние энерговложения на течение в донной области модели // “Ломоносовские Чтения 2014”, Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2014.

- 3) Ханхасаева Я.В., Луцкий А.Е. Задача 3D обтекания модели летательного аппарата при активном воздействии на поток // Международная конференция “Дифференциальные уравнения и математическое моделирование”, 22 – 27 июня 2015 г., Улан-Удэ, Россия.
- 4) Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В. Исследование влияния подвода энергии в поток на режим обтекания модели летательного аппарата // XI Всероссийский Съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 20 - 24 августа 2015 г., г. Казань.
- 5) Lutsky A.E., Khankhasaeva Ya.V. The Influence of the Energy Sources on the Flow Around Aircraft Models // 15-е Международное Собрание по Магнитоплазменной Аэродинамике (WSMPA 2016), 19-21 апреля 2016 г., Москва.
- 6) Борисов В.Е., Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В.. Влияние источников энергии в потоке на обтекание ГЛА Х-43 // 10-я Всероссийская школа-семинар "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем", АФМ-2016, 5-9 декабря 2016 г., Москва.
- 7) Khankhasaeva Ya., Borisov V., Lutsky A. Energy Impact on the Flow Around Hypersonic Flying Vehicles // Japan-Russia workshop on innovative approaches and supercomputer technologies in computational physics, Moscow, March 14-15, 2017.
- 8) Ханхасаева Я.В., Борисов В.Е., Луцкий А.Е. Влияние источников энергии в потоке на обтекание гиперзвуковых летательных аппаратов // 16-ое Международное Собрание по Магнитоплазменной Аэродинамике (WSMPA 2017), 5-7 апреля 2017 г., Москва.
- 9) Ханхасаева Я.В., Борисов В.Е., Луцкий А.Е. Обтекание ГЛА Х-43 при наличии внешних источников энергии // VI Международная конференция “Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО17)”. 26 июня - 1 июля 2017 г., Улан-Удэ.
- 10) Луцкий А.Е., Ханхасаева Я.В., Численное моделирование сверхзвукового обтекания затупленного тела при периодическом энерговложении // Аналитические и численные методы решения задач гидродинамики, математической физики и биологии. Международная конференция, посвященная 100-летию К.И. Бабенко. 2019.
- 11) Khankhasaeva Ya.V., Lutsky A.E., Energy source influence on three-dimensional flow past an aircraft // 20-ое Международное Собрание по Магнитоплазменной Аэродинамике (WSMPA 2021), 25-27 мая 2021 г., Москва.
- 12) Ханхасаева Я.В., Вложение энергии как средство управления аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов // Конференция СМУиС ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 24 марта 2023 г., Москва.
- 13) Ханхасаева Я.В., Луцкий А.Е. Трехмерное обтекание летательного аппарата сложной формы при различных углах атаки и наличии энергоисточника // VIII Международная конференция "МАТЕМАТИКА, ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ" (МПМО'23), Россия, г. Улан-Удэ, оз. Байкал, 26 июня - 1 июля 2023.

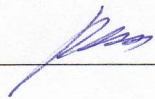
Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация «Влияние вложения энергии в поток на трехмерное обтекание летательных аппаратов» Ханхасаевой Яны Владиславовны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».


Заключение принято на расширенном заседании научного семинара отдела №15 «Математическое моделирование» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН под руководством член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отделом №15 В.Ф. Тишкина и д.ф.-м.н., г.н.с. А.А. Кулешова.

Присутствовало на заседании 19 человек, из них 12 докторов физико-математических наук.

Результаты голосования: "за" - 19 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол № 5 от "8" июня 2023 г.



Тишкин Владимир Федорович
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отд. №15



Кулешов Андрей Александрович
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. №15