

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
проректор по научной работе
и стратегическому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Б.Н. Коробец

2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Сильвестрова Павла Валерьевича

«Определение аэродинамических характеристик перспективных летательных аппаратов с использованием комплекса авторских компьютерных кодов»
по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация Сильвестрова П.В. посвящена компьютерному моделированию аэродинамики гиперзвуковых летательных аппаратов различной конструкции и созданию комплекса компьютерных программ для проведения соответствующих расчетов.

Актуальность темы

Актуальность диссертационного исследования связана с необходимостью развития математических моделей и компьютерных кодов, позволяющих численно исследовать обтекание высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА). Применение компьютерного моделирования позволяет существенно сократить объем наземных и летных экспериментов, что в свою очередь повышает экономическую эффективность создания облика перспективных ВЛА. Еще одной задачей является создание вычислительного комплекса, позволяющего объединить под управлением единой оболочки специализированные национальные компьютерные коды и базы данных, что позволяет значительно упростить процесс численного моделирования за счет использования удобных элементов графического интерфейса.

Усманов

Краткий анализ содержания работы

Настоящая диссертационная работа имеет следующую структуру:

Во **введении** отражена актуальность исследуемых проблем, сформулирована цель работы и кратко отражена структура диссертации.

В **первой главе** представлен обзор моделей механики сплошной среды и описаны уравнения, лежащие в основе разработанных компьютерных кодов.

Представлена система уравнений Навье-Стокса для однокомпонентного газа с граничными условиями, а также система уравнений Навье-Стокса для химически реагирующего многокомпонентного газа, с учетом колебательных составляющих температуры и учетом эффектов ионизации и переноса селективного теплового излучения.

Представлено описание численных алгоритмов решения данных систем уравнений, позволяющих использовать неструктурированные сетки. Данные алгоритмы относятся к конечно-объемным методам с использованием метода расщепления по физическим процессам. Рассмотрен также алгоритм семейства схем AUSM с использованием расщепления по числу M и давлению. Отмечено, что в диссертации реализован вариант схемы AUSM PW, при котором удается устранить численные неустойчивости в области сильных возмущений, а также избавиться от эффекта «карбункул» в окрестности критической точки.

Во **второй главе** представлен результат перекрестной верификации авторского компьютерного кода UST3D-AUSMPW, с компьютерными кодами UST3D и UG3D, созданными академиком РАН, д.ф.-м.н., профессором Суржиковым С.Т. и к.ф.-м.н. Крюковым И.А. Рассмотрены задачи об обтекании: бесконечного клина, ВЛА Х-43 с ГПВРД и ВЛА Х-51 с ГПВРД,

Показано хорошее согласие полученных результатов, подтверждающее достоверность расчетных данных.

В **третьей главе** описан результат валидации компьютерного кода диссертанта на основе данных наземных испытаний летательного аппарата из эксперимента HIFiRE-1. Отмечается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

В **четвертой главе** представлено расчетное исследование аэродинамики летательных аппаратов со сложной геометрией при разных углах атаки и скоростных режимах. Исследование оформлено в виде базы данных результатов численного моделирования, которая позволит проводить тестирование вновь создаваемых кодов, а

также для проведения работ по поиску рациональных аэродинамических форм ВЛА.

В **пятой главе** представлен разработанный диссертантом комплекс авторских компьютерных кодов, предназначенный для объединения под управлением единой графической оболочки расчетных программ для моделирования внешней аэротермодинамики компоновки высокоскоростных летательных аппаратов и их силовых установок.

В **заклучении** кратко формулируются основные выводы по результатам, полученным в диссертационной работе.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов диссертации подтверждается физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств физической механики, а также хорошим качественным и количественным соответствием полученных результатов известным экспериментальным данным и численным решениям, полученным с помощью других программных комплексов.

Оценка научной новизны и практической значимости

В диссертационной работе представлен ряд новых результатов:

1. Представлена программная реализация метода расщепления по физическим процессам математической модели вязкого сжимаемого теплопроводного газа на трехмерных неструктурированных сетках с реализацией метода расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек AUSM PW.

2. Выполнено численное моделирование аэротермодинамики летательных аппаратов со сложной геометрией с использованием разработанного компьютерного кода на неструктурированных тетраэдральных сетках.

3. Создан комплекс авторских компьютерных кодов, для решения фундаментальных и прикладных задач разработки перспективных ВЛА, и их силовых установок: оценки аэродинамических характеристик, численное моделирование пространственных картин обтекания, формирование актуальных расчетных баз данных.

Замечания по диссертационной работе

По работе можно высказать следующие замечания:

1) В формулах (8) на стр. 48 не пояснено, что такое коэффициенты $\delta_{1,w}$, $\delta_{2,w}$ и др. Видимо, это символы Кронекера, которые можно было бы соответствующим образом применить, так как в формулах (1).

2) На стр. 143 отмечено, что при числе Маха $M=9,95$ «наблюдается

нестационарность течения потока, которая приводит к несимметричности температуры воздуха за аппаратом при нулевом угле атаки». Однако причина возникновения этого эффекта не проанализирована в диссертации. Полезно было бы пояснить, что данное явление не возникло из-за особенностей численного моделирования, а обусловлено определенными физическими закономерностями обтекания.

3) В постановке задачи о течении химически реагирующего газа не указано, какие соотношения использованы для скоростей химических реакций (уравнение (11)), и какое число компонентов N_s рассматривалось в реальных расчетах ?

4) Не указано явным образом, какие граничные условия были поставлены на входе в воздухозаборник ВЛА типа Х-43 и Х-51 ? От этих граничных условий, как известно, могут зависеть аэродинамические коэффициенты. Также остается непонятным – моделировалось ли течение в самом воздухозаборнике при расчете аэродинамических коэффициентов ?

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают актуальность и значимость полученных результатов, а также не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Работа является законченным исследованием и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведенные научные исследования можно охарактеризовать как научно-обоснованный систематический анализ важных фундаментальных и прикладных задач механики сплошной среды. 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.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате, соответствующем содержанию диссертации. 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 Сильвестров Павел Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Настоящий отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э.Баумана «17» марта 2021 года, протокол № 9.

Заведующий кафедрой
«Вычислительная математика и математическая физика»
МГТУ им. Н.Э.Баумана,
доктор физико-математических наук, профессор



Ю.И. Димитриенко

Доцент кафедры «Вычислительная математика
и математическая физика»
МГТУ им. Н.Э.Баумана,
кандидат физико-математических наук



А.А. Захаров

Подписи Ю.И. Димитриенко и А.А. Захарова заверяю

