

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией
фундаментальных исследований СПбГУ ГА Исаева С.А.
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

Диссертационная работа посвящена численному моделированию ламинарного обтекания высокоскоростных летательных аппаратов, включая тестирование авторских кодов при сравнении с аналогами, а также с экспериментальными данными. Проблематика диссертации фундаментальная, связанная с разработкой и обоснованием методов численного моделирования с использованием многопроцессорных компьютерных систем. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (5. Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (3. Информационно-телекоммуникационные системы) и связана с разработкой критических технологий РФ (18. Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем). Диссертация выполнена в известной научной школе Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, руководимой академиком РАН Суржиковым С.Т. Исследование выполнено, в том числе, при поддержке РФФИ. Таким образом, представленную диссертацию можно признать актуальной.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложен и обоснован приближенный метод расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек AUSM PW в процедуре расщепления по физическим процессам на трехмерных неструктурированных сетках в приложении к аэротермодинамике высокоскоростных летательных аппаратов различной формы.
2. На основе решения задачи обтекания экспериментальной гиперзвуковой модели HIFiRE-1 верифицирован авторский компьютерный код, реализующий модель вязкого сжимаемого теплопроводного газа на трехмерных неструктурированных сетках.
3. Проведено сравнение полученного в результате расчетов угла отклонения ударной волны вокруг конусообразной носовой части фюзеляжа HIFiRE-1 с углом косога скачка уплотнения в газе для конуса при разных числах Маха. Отмечено хорошее совпадение угла наклона ударной волны с теоретическим значением.
4. При числе Маха $M = 9.95$ прогнозируется нестационарный режим течения, который приводит к несимметричности поля температуры воздуха за аппаратом HIFiRE-1 при нулевом угле атаки.

Практическая значимость работы состоит в разработке программного комплекса, ориентированного на использование неструктурированных расчетных сеток и который позволяет решать целый ряд прикладных задач при разработке внешнего облика летательных аппаратов и их силовых установок в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Научные исследования, проведенные в работе, были выполнены в рамках госзаданий АААА-А17-117021310372-6, АААА-А20-120011690135-5.

Апробация работы вполне приемлемая, хотя опубликованные статьи вышли, в основном, в электронном журнале.

Структура работы. Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, раскрывается её цель, практическая значимость и научная новизна. В **первой главе** представлены математические модели совершенного вязкого сжимаемого газа, применяемые в аэротермодинамике. Во **второй главе** описан процесс верификации компьютерного кода автора на примере моделирования обтекания модели бесконечного клина и гиперзвуковых летательных аппаратов X-43 и X-51. В **третьей главе** проведена валидация компьютерного кода диссертанта на данных наземного эксперимента HIFiRE-1. В **четвертой главе** представлены результаты расчетно-теоретического анализа распределения давления, плотности и температуры газа вдоль поверхности летательных аппаратов X-34, X-43 и X-51 на диапазонах чисел Маха и углов атаки. В **пятой главе** описана разработанная диссертантом интерактивная информационно-расчетная система (ИИРС), представляющая собой комплекс компьютерных кодов и баз данных результатов моделирования аэротермодинамики высокоскоростных летальных аппаратов и их силовых установок. В **заключении** кратко формулируются основные выводы диссертации.

Работа не вполне типичная для диссертаций по специальности 01.02.05. Новизны по гидродинамической части немного. Работа в большей части методическая, тестовая, обосновывает расчетные методы в аэротермодинамике гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) и полностью соответствует содержанию работ по вычислительной гидродинамике. Тем не менее, в 1994 году на конференции по современным проблемам гидромеханики в Севастополе наш классик Г.Г.Черный провозгласил, что нет никакой вычислительной гидродинамики, а есть численные методы в механике жидкости и газа. Поэтому диссертация соответствует специальности 01.02.05. Украшает работу сравнение численных прогнозов с экспериментальными данными. Общее впечатление от диссертации Сильвестрова В.А. положительное, хотя имеются претензии.

Несколько слов о концептуальной обоснованности работы и об ее месте в спектре работ данного профиля.

Работа квалификационная, посвящена разработке, верификации и применению авторского кода для расчета обтекания ГЛА, а также созданию ИИРС. Объект исследования достойный внимания. Тематика актуальная. Расчетные коды, создаваемые под руководством академика Суржикова С.Т., к которым относится и данная разработка, уникальные и существенно отличаются от других известных зарубежных и отечественных кодов, таких как CFX, Fluent, Star CCM+, ЛОГОС, SMILE, FlowVision, SigmaFlow и др. Уникальность придает им учет влияния физико-химических превращений при высоких числах Маха и радиационного теплообмена. Однако диссертация не содержит расчетных материалов по этой проблематике, а значит и другие вышеуказанные пакеты могли быть применены для сравнения.

Сделанные дальнейшие замечания и вопросы призваны расширить область дискуссии и придать импульс дальнейшим разработкам.

1. Обзор, почему – то помещенный во введение, избыточен. ЛТП, турбулентность находятся за пределами внимания данной работы, а им тут уделено много внимания. Хотелось бы в этой связи указать на работы оппонента по гиперзвуку, не попавшие в поле зрения автора. Важно подчеркнуть, что применяется неявная схема решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса,

которые замыкаются уравнениями модели переноса сдвиговых напряжений. Рассчитываются эксперименты Хорстмена (при $M=6$), аэробаллистические эксперименты в ФТИ на трассе и эксперимент Запрыгаева В.И. в ИТПМ СО РАН.

- Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии применительно к расчету турбулентных отрывных и струйных течений сжимаемого вязкого газа со скачками уплотнения и ударными волнами в рамках модели переноса сдвиговых напряжений. 6 глава в коллективной монографии под редакцией В.А. Левина, Н.А. Фомина, В.Е. Фортова. Физика ударных волн, горения, детонации, взрыва и неравновесных процессов. Часть 2. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2018. С. 216–228.

- Исаев С.А., Михалев А.Н., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Моделирование турбулентного обтекания каплевидного тела с конической юбкой // Журнал технической физики. 2007. Т.52. №8. С.29-35.

- Исаев С.А., Лысенко Д.А. Тестирование численных методов, конвективных схем, алгоритмов аппроксимации потоков и сеточных структур на примере сверхзвукового течения в ступенчатом канале с помощью пакетов CFX и FLUENT // Инженерно-физический журнал. 2009. Т.82. №2. С.326-330.

- Леонтьев А.И., Исаев С.А., Садовников Г.С. Численное моделирование снижения тепловых нагрузок при сверх- и гиперзвуковом обтекании плоской стенки с нанесенными траншеями и лунками // Тепловые процессы в технике. 2009. №9. С.362-366.

- Исаев С.А., Липницкий Ю.М., Михалев А.Н., Панасенко А.В., Усачов А.Е. Моделирование сверхзвукового турбулентного обтекания цилиндра с соосными дисками // Инженерно-физический журнал. 2011. Т.84. №4. С.764-776.

- Исаев С.А., Липницкий Ю.М., Баранов П.А., Панасенко А.В., Усачов А.Е. Моделирование турбулентной сверхзвуковой недорасширенной струи, истекающей в затопленное пространство, с помощью модели переноса сдвиговых напряжений // Инженерно-физический журнал. 2012. Т.85. №6. С. 1253-1267.

2. Применение явной схемы интегрирования не позволяет сильно сгущать ячейки сетки у стенки. Ограничитель на число Куранта увеличивает трудоемкость расчетов. Почему акцент сделан на тетраэдных сетках, а не гексагональных? Насколько мелкие ячейки используются в приграничных зонах и области скачков?

3. На стр.98 «имеющиеся различия и погрешности вычислений объясняются невысокой подробностью расчетной сетки, а также особенностью реализации численной модели в области отрывного течения». Какие особенности реализации модели в области отрывного течения имеет ввиду автор?

4. В диссертации нигде не указаны числа Рейнольдса.

5. Чьи данные расчетов по различным моделям турбулентности показаны на рисунках 3.6-3.8? Ведь в диссертации турбулентность не рассматривается. Кстати рис.3.1.12 демонстрирует прекрасное согласие теплообмена в летном эксперименте и прогнозов по SST-модели!

6. Сравнение прогнозов по ламинарной модели и экспериментов на рис.3.4.1 и 3.4.2 наводит на мысль о том, что есть отрыв, который в ламинарной модели не ловится. Несколько странным выглядит влияние количества ячеек. Не понятны причины осцилляций давления. И опять опущено число Рейнольдса!

7. Зафиксировано, что «при числе Маха $M = 9.95$ наблюдается нестационарный режим обтекания, который приводит к несимметричности поля температуры воздуха за аппаратом при нулевом угле атаки». А в чем состоит причина нестационарности?

8. В четвертой главе авторский код применяется к расчету обтекания нескольких ГЛА. Число Рейнольдса опять нигде не фигурирует. Рассуждения по поводу влияния сетки не вполне корректны, т.к. следовало обосновать сеточную сходимость результатов! Иллюстрации мелкие. Следовало бы укрупнить.

9. Пятая глава представляет обобщение кодов в интерактивную

информационно-расчетную систему (ИИРС). Роль этой главы в диссертации велика, но глава сугубо декларативная. Следует отметить, что выводы 5-9 по работе посвящены именно этой системе ИИРС. Было бы неплохо показать ее работу на примерах с использованием моделей физико-химических превращений и радиационного теплообмена.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.


Таким образом, представленная диссертационная работа является законченным научно-квалификационным исследованием по численному моделированию ламинарного обтекания высокоскоростных летательных аппаратов, включая тестирование авторских кодов при сравнении с аналогами, а также с экспериментальными данными. Таким образом, представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям п. 9 Положения ВАК «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым 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».

Я, Исаев Сергей Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сильвестрова П.В., и их дальнейшую обработку.

Заведующий лабораторией
фундаментальных исследований
Санкт-Петербургского государственного
университета гражданской авиации,
доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа
и плазмы, профессор

18.03.2021

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб, Пилотов, 38, info@spbguga, 7041818

 Исаев Сергей Александрович

Подпись профессора Исаева С.А. удостоверяю

Проректор по персоналу -
Начальник управления кадров



М.И. Лобов