

Отзыв
официального оппонента Новикова Андрея Валерьевича
на диссертацию Способина Андрея Витальевича
«Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками
с твёрдыми частицами»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-
математических наук по научной специальности 1.1.9. – «Механика
жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа А. В. Способина посвящена численному моделированию сверхзвуковых течений газа с частицами на основе лагранжева подхода к описанию дисперсной фазы в сочетании с эйлеровым описанием несущей. Выполняется расчёт движения каждой частицы с учётом вращения и определение столкновений частиц на основании пересечения их траекторий. Это позволило изучить на близком к физическому уровню происходящие в двухфазном ударном слое процессы и влияющие на них факторы, а также провести сопоставление результатов прямого моделирования со статистическим подходом к расчёту столкновений в запылённых потоках. Впервые путём прямого численного моделирования детально исследовано изменение структуры течения газа вблизи поверхности затупленного тела в сверхзвуковом потоке под влиянием немногочисленных крупных частиц, выходящих за границы ударного слоя после отражения от поверхности, выявлены механизмы, определяющие изменение воздействия газа на обтекаемую поверхность. Перечисленные факторы определяют **актуальность** представленной работы с фундаментальной точки зрения.

Практическая значимость работы обусловлена активной разработкой в настоящее время движущихся в атмосфере высокоскоростных летательных и спускаемых аппаратов, на пути которых могут возникать облака частиц в твёрдой фазе. Оценка средствами математического моделирования теплового и эрозионного воздействия двухфазного потока на теплозащитный материал может существенно сократить затраты на разработку изделия ввиду высокой сложности и стоимости проведения натурных испытаний. Несомненную **практическую ценность** представляют и разработанные автором трёхмерные алгоритмы расчёта обтекания сверхзвуковым вязким потоком движущихся тел на основе бессеточного метода решения системы уравнений газовой динамики. Лежащая в основе их программного кода технология OpenCL позволяет обеспечить многократное повышение быстродействия при применении графических процессоров и не зависеть от конкретного производителя аппаратного обеспечения.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«22» 02 2023

Диссертационная работа общим объемом 313 страниц состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 361 наименование.

Главы с первой по третью посвящены детальному численному исследованию процессов, происходящих в ударном слое у поверхности затупленного тела, помещённого в сверхзвуковой поток газа с твёрдыми частицами.

В **первой** главе работы автором подробно представлена полная математическая модель двухфазного ударного слоя. Течение невязкого газа определяется решением системы двумерных нестационарных уравнений Эйлера с дополнительными членами, характеризующими обмен импульсом и энергией с фазой частиц. Используется известная схема Хартена – Лакса – ван Лира численного решения уравнений газовой динамики, применяются адаптивные декартовы сетки, позволяющие моделировать обтекание тел с криволинейными границами. Расчёт теплообмена с обтекаемой поверхностью выполняется внешним кодом, реализующим решение уравнений пограничного слоя. Описана модель движения дисперсной фазы, приведены уравнения сил, действующих на частицу в газовом потоке, а также её теплообмена с окружающей средой. Приведена модель попарного столкновения частиц, а также отражения частицы от твёрдой поверхности. Представлена оригинальная модель полномасштабного прямого численного моделирования потока частиц, основанная на решении уравнений движения частиц, аппроксимации их траекторий, поиске и воспроизведении всех соударений. Поскольку модель предполагает соотношение вычислительных и реальных частиц один-к-одному при заданных условиях расчёта, применительно к двумерным газовым течениям автором предложена квазитрёхмерная модель дисперсного потока, снижающая требования к вычислительным ресурсам.

Выполнена серия вычислительных экспериментов по поперечному обтеканию запылённым потоком кругового цилиндра, в ходе которых исследовались влияние размера частиц и их концентрации на распределение примеси в пространстве и течение несущего газа в ударном слое, а также на параметры ударного воздействия примеси на поверхность. Рассматривалась роль таких факторов, как учёт соударений между частицами, закрутка частиц вследствие столкновений и обратное влияние дисперсной фазы на несущую.

Во **второй** главе работы с целью сокращения вычислительных затрат и обеспечения расчётов осесимметричных течений газа в сочетании с движением частиц в трёхмерном пространстве возможности модели расширяются посредством использования частиц-представителей. При этом обнаружение столкновений по-прежнему производится путём расчёта пересечения траекторий частиц с соответствующими поправками на частицу-представитель. Рассматриваются течения газа с примесью частиц полидисперсного, в частности, бидисперсного состава и возникающие при этом эффекты. Реализован розыгрыш столкновений

между частицами методом Монте-Карло. Выполнено сравнение результатов статистического моделирования с прямым дискретно-траекторным.

В **третьей** главе представленная выше модель двухфазного ударного слоя дополняется известной полуэмпирической моделью эрозионного разрушения тела, а также моделью расчёта излучения в запылённом потоке на основе P_1 -приближения. Автором предложен оригинальный алгоритм моделирования изменения формы тела. Нагрев обтекаемого газом тела описывается нестационарным уравнением теплопроводности, для его решения используется неявная схема на адаптивных декартовых сетках с возможностью учёта изменения границы тела. Посредством численных экспериментов показано существенное влияние учёта столкновений между частицами на интенсивность уноса массы при эрозионном разрушении тела в запылённом потоке.

Главы с четвёртой по шестую посвящены численному моделированию движения ограниченного числа крупных частиц в ударном слое.

В **четвёртой** главе диссертации представлена вычислительная модель движения одиночной высокоинерционной частицы вдоль оси симметрии затупленного тела, помещённого в сверхзвуковой поток, в её основе лежат разработанные в предыдущих главах работы алгоритмы решения системы уравнений газовой динамики на адаптивных декартовых сетках. Детально описана эволюция течения в ударном слое при выходе частицы за фронт головной ударной волны, показано возникновение локальных областей интенсификации конвективного теплообмена на обтекаемой поверхности. Для случая продольного обтекания цилиндра с плоским торцом дано объяснение механизмам возникновения наблюдаемого в экспериментах колебательного процесса. При воспроизведении в расчётах условий стендовых испытаний было получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных картин течения, а также частоты и амплитуды колебаний параметров газа на поверхности обтекаемого тела.

Используя распараллеливание вычислений на графических процессорах оригинальный алгоритм адаптивных скользящих декартовых сеток моделирования движения крупных частиц вдоль сложной траектории в двумерной постановке представлен в **пятой** главе работы. На качественном уровне показана возможность относительно продолжительного существования зоны интенсификации теплового потока вблизи передней критической точки при отклонении частицы от плоскости симметрии и движении ансамбля частиц.

Шестая глава посвящена разработке трёхмерной вычислительной модели ударного слоя с крупными частицами. В её основе лежит бессеточный метод решения системы уравнений газовой динамики. Переход от адаптивных декартовых сеток к бессеточному методу обусловлен необходимостью оптимизации потребления вычислительных ресурсов при расчётах в трёхмерном пространстве. Автором разработаны и прошли верификацию метод

скользящих облаков и метод единого облака расчётных узлов, предназначенные для моделирования движения и газодинамического взаимодействия частиц в ударном слое. Программная реализация метода использует распределённые вычисления на графических процессорах. Численное моделирование движения частиц в трёхмерном ударном слое подтвердило эффекты, полученные в четвёртой и пятой главах в осесимметричной и плоской двумерной постановках.

В **заключении** сформулированы результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Материал диссертационной работы имеет чёткое и ясное изложение, подробно проиллюстрирован графиками и рисунками. Логическая структура работы отражает поэтапное развитие разработанных автором методов и алгоритмов моделирования сверхзвукового ударного слоя с твёрдыми частицами, нацеленных на расширение спектра решаемых задач и изучение новых явлений.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается строгостью математических постановок, адекватностью математических моделей, применением известных численных методов. В целях верификации представленных алгоритмов и разработанного на их основе программного обеспечения автор приводит результаты решения типовых задач сверхзвуковой аэродинамики, сопоставляет их с известными приближённо-аналитическими решениями и результатами расчётов другими авторами. Результаты моделирования движения крупной частицы в ударном слое хорошо согласуются с имеющимися данным стендовых испытаний. Корректность предложенных автором алгоритмов моделирования движения крупных частиц бессеточным методом подтверждается совпадением результатов расчёта обтекания неподвижной частицы с результатами моделирования движения частицы в неподвижном газе при сохранении скорости частицы относительно газа.

Научная новизна работы определяется разработанными автором комплексной вычислительной моделью двухфазного ударного слоя, основанной на полномасштабном прямом численном моделировании динамики частиц с учётом столкновений, и многомасштабной моделью ударного слоя с крупными частицами, а также полученными с их помощью новыми знаниями о структуре течения и определяющих параметрах воздействия запылённого сверхзвукового потока на обтекаемую поверхность.

По представленной диссертации имеются следующие пожелания и **замечания**:

1. При полномасштабном прямом численном моделировании запылённого потока расчёт столкновений частиц между собой и с поверхностью производится последовательно в хронологическом порядке, что существенно снижает эффективность распараллеливания вычислений.

2. При эрозионном разрушении тела непосредственно вблизи поверхности в реальности образуется слой осколков из материала стенки. В представленной модели взаимодействие частиц с осколками не учитывается, хотя оно может способствовать усилению отмеченного в работе экранирующего эффекта.
3. В работе рассматриваются ламинарные течения газа, при этом число Рейнольдса набегающего потока имеет диапазон $10^5 - 10^6$. Интерес представляет дополнение представленных моделей ударного слоя моделями турбулентности и рассмотрение влияния частиц на турбулентный пограничный слой и, как следствие, конвективный тепловой поток к поверхности.
4. Распараллеливание представленных алгоритмов решения системы уравнений газовой динамики с моделью движения крупных частиц реализовано применительно к графическим процессорам в рамках одного компьютера с общей памятью. При решении трёхмерных задач ресурсов одного компьютера может оказаться недостаточно. Целесообразно рассмотреть доработку программ, обеспечив использование суперкомпьютеров кластерного типа с распределённой памятью, например, с помощью технологии MPI.
5. Список выносимых на защиту положений диссертации представляется слишком подробным, стоило бы более явно выделить основные положения.

Заключение

Отмеченные выше замечания носят рекомендательный характер, не умаляют достоинств диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку.

В целом, представленная диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком профессиональном уровне, в ходе работы над которой автором построены развитые физико-математические модели сверхзвукового обтекания тела запылённым потоком и движения высокоинерционных частиц в ударном слое. С их помощью получен ряд новых научных результатов, обоснованность которых не вызывает сомнений, а их совокупность представляет собой крупное научное достижение в области изучения двухфазных течений. Работа полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Основные результаты работы прошли **апробацию** на многочисленных научных конференциях, форумах, семинарах и в полной мере отражены в 72 научных публикациях, в числе которых 25 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК или базы данных Web of Science и Scopus.

В диссертации корректно указаны ссылки на использованные источники, автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты работы.

Представленная работа «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, включая п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842. Считаю, что её автор, Способин Андрей Витальевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и
плазмы,

начальник отдела №2 в НИО-8

Федерального автономного учреждения «Центральный
аэрогидродинамический институт имени профессора
Н. Е. Жуковского»

почтовый адрес: 140180, Россия, Московская обл.,

г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

телефон: +7 (495) 556-3860

e-mail: andrey.novikov@tsagi.ru

web-сайт: <https://www.tsagi.ru>

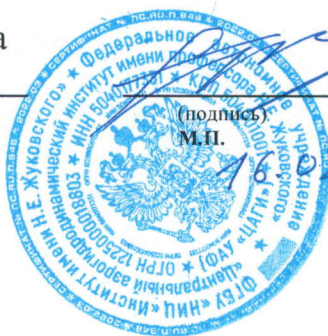
Новиков Андрей Валерьевич

16 февраля 2023

Подпись Новикова Андрея Валерьевича удостоверяю

Учёный секретарь Учёного совета
ФАУ ЦАГИ

(должность)



Таковицкий С.А.

(Ф.И.О.)