

## ОТЗЫВ

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

Проблема численного моделирования двухфазных течений является актуальной на протяжении нескольких последних десятилетий, что связано, в первую очередь, с необходимостью решения ряда практических задач, таких как абразивная обработка поверхностей, напыление покрытий, защита рабочих поверхностей от эрозионного воздействия, преодоление летательными аппаратами участков атмосферы с частицами снега, воды, пыли, в том числе вулканической, встречающейся на больших высотах. На протяжении этого времени разработано немало математических моделей двухфазного потока, часть из них реализованы в коммерческих и открытых программных пакетах вычислительной гидрогазодинамики.

В зависимости от способа описания дисперсной фазы модели можно разделить на два класса. Подход на основе взаимопроникающих континуумов, в котором относятся модели первого класса, использует уравнения сплошной среды для описания как несущей фазы, так и дисперсной составляющей двухфазного потока. Преимуществом данного подхода является возможность использовать единый математический аппарат для решения систем уравнений несущей и дисперсной фаз, однако сложность представляет моделирование запылённых потоков с высокой концентрацией примеси, а также учёт взаимодействия набегающих частиц с отраженными от поверхностей, находящихся в потоке тел. В основе моделей второго класса лежит лагранжев подход к описанию дисперсной фазы, построенный на решении уравнений движения отдельных частиц, в сочетании с эйлеровым описанием несущей фазы, что даёт возможность детально исследовать такие факторы, как столкновения между частицами, их закрутку, разброс частиц по размерам. Обратной стороной моделей данного класса являются повышенные требования к вычислительным ресурсам, вследствие чего, как правило, в расчётах используются представители групп реальных частиц и статистические методы розыгрыша столкновений между ними.

Отличительной чертой рассматриваемой диссертационной работы является прямое полномасштабное моделирование запылённых потоков на основе лагранжевого подхода, при котором количество моделируемых частиц соответствует числу реальных. Практическая реализация подобных моделей стала возможна лишь недавно и связана с

обеспечения МАИ  
«14» 02 2023 1



активным развитием возможностей вычислительной техники. Предложенный подход позволяет детально исследовать происходящие в двухфазном потоке процессы с минимальными допущениями и высокой степенью достоверности, а также провести сопоставление со статистическими моделями.

Наряду с расчётами запылённых потоков с миллионами частиц, большой интерес вызывает детальное исследование наблюдаемых в реальных экспериментах интенсификации тепловых потоков и возникновения колебательных режимов течения в ударном слое в присутствии даже небольшого числа относительно крупных частиц.

Всё перечисленное свидетельствует об **актуальности** темы диссертационной работы.

Объем представленной диссертации составляет 313 печатных страниц, она включает введение, шесть глав, заключение и список источников из 361 позиции. Текст работы имеет чёткие и ясные язык и структуру, дополнен 188 поясняющими рисунками и графиками. По спектру рассматриваемых явлений в работе можно выделить две примерно равные по объёму части, которые связывает в единое целое поэтапно развиваемый автором от главы к главе аппарат математического моделирования сверхзвукового ударного слоя с частицами.

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснованы значимость и новизна исследования, представлен краткий обзор содержания диссертации.

В **первой** главе работы сформулирована математическая модель двумерного потока газа с примесью частиц применительно к задаче обтекания преграды в сверхзвуковом режиме. Течение невязкого газа считается двумерным ламинарным и описывается системой уравнений Эйлера с дополнительными членами, учитывающими обмен импульсом и энергией с фазой частиц. Для численного решения уравнений газовой динамики применяется метод конечных объемов на декартовых сетках с измельчением ячеек вблизи поверхности обтекаемого тела. В работе используется оригинальная квазитрёхмерная модель динамики частиц, основанная на решении уравнений движения всех моделируемых частиц, каждая из которых представляет одну реальную, а параметры в момент столкновения определяются сближением частиц в пространстве-времени. Все столкновения реализуются последовательно в хронологическом порядке. В направлении оси, ортогональной плоскости течения, на движение частиц накладываются периодические граничные условия.

В результате проведённой серии вычислительных экспериментов по поперечному обтеканию кругового цилиндра показано усиление влияния примеси на несущую фазу, которое проявляется в сокращении отхода ударной волны и росте давления в ударном слое, эффект усиливается с ростом концентрации примеси и при измельчении самих частиц.



Влияние частиц на температуру газа в ударном слое оказалось разнонаправленным и зависит от их размера. Прямым моделированием показано, что учёт столкновений между частицами в значительной степени определяет распределение частиц в пространстве и снижает непосредственное суммарное ударное воздействие примеси на поверхность обтекаемого тела, т.е. возникает экранирующий эффект.

Во **второй** главе работы модель двухфазного ударного слоя доработана с целью обеспечения возможности расчёта обтекания осесимметричных тел, в частности, сферы, сверхзвуковым запылённым потоком. Система уравнений газовой динамики, записанная в цилиндрической системе координат, решается методом конечных объемов в осесимметричной постановке. Движение частиц рассчитывается в трёхмерном пространстве, при этом моделируемая частица выступает представителем ансамбля реальных частиц. В вычислительных экспериментах по обтеканию затупленного тела запылённым потоком газа с частицами двух характерных размеров (так называемой, бидисперсной примесью) вызывает интерес обнаруженное явление перераспределения ударного воздействия на поверхность в пользу фракции частиц меньшего размера. Наряду с прямым расчётом столкновений между частицами, реализован статистический подход на основе метода Монте-Карло, проведено сравнение двух подходов.

В **третьей** главе сформулирована и реализована комплексная математическая модель теплообмена преграды в запылённом потоке, учитывающая эрозионное воздействие примеси на поверхность, а также радиационный теплообмен обтекаемого тела с частицами. Моделируется изменение формы и нагрев тела в потоке частиц, показана роль экранирующего эффекта от столкновений между частицами, который в проведённых расчётах приводил к двукратному снижению интенсивности эрозионного уноса массы. Учёт столкновений способствовал росту концентрации примеси вблизи поверхности преграды и дополнительному нагреву частиц, как от неупругих столкновений частиц друг с другом, так и вследствие их более продолжительного пребывания в ударном слое и конвективного теплообмена с газом. Совокупность действия этих факторов приводила к росту потока теплового излучения от примеси к поверхности тела.

Взяв за основу реализованные в предыдущих главах диссертации алгоритмы численного решения задач сверхзвуковой аэродинамики на декартовых сетках в областях с подвижными границами, в **четвёртой** главе диссертации автор разрабатывает модель расчёта движения крупной сферической частицы по симметрии тела, помещённого в сверхзвуковой воздушный поток, с выходом частицы за границы ударного слоя. Рассматривается обтекание газом сферы, а также кругового цилиндра с плоским торцом в продольном направлении. Показано взаимодействие скачка уплотнения от частицы с



головной ударной волной с образованием направленной в сторону тела газовой струи, вызывающей появление на поверхности тела локальной зоны, в которой конвективный тепловой поток от газа превышает «невозмущённый» уровень в несколько раз. При этом во фронтальной области образуется вихревое движение газа. Причём, в случае обтекания цилиндра с плоским торцом, вихревое течение входит в колебательный режим, циклически изменяясь в размерах. Адекватность модели и корректность расчётов подтверждаются прямым сравнением с имеющимися экспериментальными данными. Хорошее совпадение получено как по картинам течения в различные моменты времени, так и по частоте и амплитуде колебаний параметров газа.

Дальнейшее развитие модель, использующая дискретизацию системы уравнений газовой динамики на декартовых сетках, получает в **пятой** главе работы. Применяя модель обтекания преграды к отдельной частице, построив для неё отдельную расчётную сетку и обеспечив сопряжение параметров газа на внешней границе локальной сетки частицы с основной, автор реализовал метод скользящих адаптивных сеток, который позволил моделировать движение крупной частицы вдоль сложной траектории, не ограничиваясь осью симметрии. Реализация модели ограничена плоской двумерной постановкой, что обусловлено применением ячеек квадратной формы, использование которых сопряжено повышенным расходом памяти компьютера. Ограничение вызвано техническими причинами и не носит принципиального характера. Моделировалось движение как одиночной частицы, так и последовательности частиц в ударном слое у поверхности сферы с отклонением от оси. На качественном уровне отмечено образование относительно «долгоживущих» областей интенсификации конвективного теплового потока на поверхности преграды, в том числе вблизи передней критической точки.

Получение количественных оценок и подтверждение обнаруженных эффектов для расчётов, аналогичных проведённым в двумерном приближении в пятой главе работы, потребовало реализации полноценной трёхмерной модели движения крупных частиц в ударном слое, которой и посвящена **шестая** глава диссертации. Применение для решения системы уравнений газовой динамики бессеточного метода с анизотропным распределением расчётных узлов в пространстве позволило существенно снизить потребление вычислительных ресурсов по сравнению с методом конечных объемов на декартовых сетках. Автором разработаны методы скользящих облаков (аналог метода скользящих сеток) и единого облака расчётных узлов моделирования движения частиц в пространстве. Выполнена верификация разработанных моделей и алгоритмов путём решения типовых задач и сравнения полученных результатов с эталонными. Программный код, благодаря используемым подходам к разработке, а также применению библиотеки



распараллеливания вычислений OpenCL, является универсальным и может выполняться как на многоядерных процессорах, так и на графических ускорителях. При моделировании движения крупных частиц в ударном слое у поверхности сферы с небольшим начальным отклонением от оси симметрии, как и в пятой главе работы, наблюдалось образование в области передней критической точки зоны с трёхкратным ростом конвективного теплового потока. Разработанные алгоритмы позволяют моделировать газодинамическое взаимодействие находящихся в ударном слое нескольких крупных частиц между собой.

В **заключении** перечислены полученные в ходе работы над диссертацией результаты, которые автор выносит на защиту.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов подтверждается прямым сравнением результатов расчётов с имеющимися экспериментальными данными по влиянию крупных частиц на течение в ударном слое, решением ряда тестовых задач на этапе разработки предложенных автором моделей, сопоставлением результатов с аналитическими формулами и полями из известного атласа газовых течений. Используются известные численные методы решения систем уравнения газовой динамики и расчёта движения и теплообмена частиц. Предложенные автором оригинальные подходы и алгоритмы соответствуют физическим процессам и проходят общую проверку на адекватность.

**Практическую ценность** представляет разработанный автором набор программ, который позволяет моделировать тепловое, радиационное и эрозионное воздействие высокоскоростного потока газа с частицами на тела сложной формы, учитывать её изменение вследствие эрозионного разрушения. Решение подобных задач особенно актуально для отрасли прикладной высокоскоростной аэродинамики. Программный код, позволяющий рассчитывать нестационарное течение вязкого газа в трёхмерной постановке с движущимися телами, линейные размеры которых могут отличаться на несколько порядков, представляет отдельный **практический интерес**, поскольку с подобной задачей, как правило, не справляются и профессиональные коммерческие CFD-пакеты.

**Научная новизна** полученных в работе результатов связана с разработкой и реализацией математической модели двухфазного ударного слоя, в которой учитываются вращение частиц, их отражение от поверхности и столкновения между частицами, а также обратное влияние на течение газа. Моделируется эрозионное разрушение и распространение излучения в ударном слое. Реализация перечисленных моделей в едином программном комплексе позволила детально исследовать процессы газодинамики и теплообмена при сверхзвуковом обтекании тела запылённым потоком, установить влияние отдельных параметров на характеристики воздействия двухфазного потока на



поверхность. Отмечено существенное влияние экранирующего эффекта от столкновений между частицами на интенсивность эрозионного уноса массы. Несомненной **оригинальностью** обладает многомасштабная модель обтекания газом высокоинерционных частиц вблизи поверхности тела на основе бессеточного алгоритма. Её программная реализация и проведённые вычислительные эксперименты впервые позволили детально изучить механизмы локальной интенсификации теплового воздействия газа на поверхность, индуцированные выходом за ударный слой крупной частицы.

По диссертации имеются следующие **замечания и вопросы**:

1. Обратное влияние примеси на газ рассчитывается осреднением частиц по ячейке (как и обычно для лагранжевых методов), что является определённым допущением, особенно при наличии отразившихся от поверхности частиц, движущихся против направления основного потока. Как учитывался в диссертации этот поток частиц? Также возникают вопросы инвариантности получаемых численных решений от размера ячейки.
2. Не принято во внимание влияния потока массы при эрозионном уносе (аналог вдува) требует дополнительного пояснения. Особенно, если считать, что масса эрозионного уноса достигает 20% от исходной массы тела (см. стр. 121 диссертации).
3. Автор работы ограничивается рассмотрением только ламинарных течений газа. Отдельный важный вопрос представляет взаимодействие частиц с ударным слоем с учётом турбулентности потока, а с инженерной точки зрения – возможность моделирования обтекания тел турбулентными запыленными течениями на основе разработанных в диссертации бессеточных алгоритмов.
4. В работе выполнен расчет взаимодействия и теплообмена двухфазного запыленного сверхзвукового потока с поверхностью тел различных форм с использованием описаний различного уровня детализации сложности. Очевидно, что проведение трехмерных расчетов сверхзвуковых запыленных течений с межфазным теплопереносом и учетом столкновений в вычислительном плане весьма трудоемкая задача, требующая больших вычислительных ресурсов. Поэтому, было бы интересно и полезно провести сравнение этих подходов как с данными других авторов, так и друг с другом с целью определения областей применимости каждого из использованных в диссертации способов расчета таких течений.
5. В Главе 2 при исследовании полидисперсных потоков частиц в основном представлены результаты расчетов по бидисперсным распределениям. Также не хватает данных по распределениям концентрации полидисперсных частиц для первых трех Глав диссертации.



6. В разделе 3.4. выполнено моделирование теплопереноса излучением для обтекания сверхзвуковым запыленным потоком тела. В работе используется гипотеза Tien and Drolen (1987) независимого рассеяния, согласно которой частица поглощает и рассеивает излучение также как будто нет окружающих ее других частиц. Хотя автор и указывает, что она не вполне применима для описания сильнозапыленных течений вблизи окрестности тела, тем не менее в работе не приводятся оценок по области применимости этого подхода, возможных предельных значений по величинам концентрации и диаметров частиц.
7. Вопрос по бессеточным методам, используемым в Главе 6. Понятны плюсы данного подхода для моделирования перемещающихся в пространстве сеток в сравнении с методом конечных объемов. На основе разложения в ряд Тейлора была построена конечно-разностная модель для этого подхода. Так как метод не консервативен, то возникают вопросы по применимости данного подхода при описании сложных двухфазных сверхзвуковых течений для других типов или геометрий.
8. Выводы по диссертации представляют собой перечисление того, что сделано в диссертации.

Подводя итоги рассмотрения диссертации Способина А.В., приходим к следующему **заклучению**. Несмотря на перечисленные замечания, общая оценка работы, безусловно, положительная, представленная диссертация является цельной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне и обладающей научной и практической ценностью. Как по объему, так и по сложности решённых задач работа соответствует уровню докторской диссертации. Содержащиеся в диссертации выводы и новые научные результаты являются в достаточной мере обоснованными, их можно считать крупным научным достижением в области исследования течения и теплопереноса высокоскоростных потоков газа с твердыми частицами.

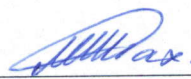
Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы модели и алгоритмы, а также полученные с их помощью новые результаты прошли **апробацию** на большом числе научных конференций и семинаров по газовой динамике, энергетике и двухфазным течениям. По теме диссертации опубликовано 25 научных статей во входящих в перечень ВАК или международных научных баз данных рецензируемых научных журналах, в том числе 6 статей без соавтора, зарегистрированы 2 объекта интеллектуальной собственности – программы для ЭВМ.

Автореферат диссертации отражает основные полученные выводы и результаты и полностью соответствует содержанию самой работы. В тексте диссертации и автореферата ссылки на использованные источники указаны верно.

Диссертационная работа «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами» полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», по научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, включая п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор — Способин Андрей Витальевич — заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, специальность 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск

  
Пахомов Максим Александрович  
Отзыв составлен «08» февраля 2023 г.

Адрес организации: 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 1,  
телефон: +7 (383) 316-53-36, e-mail: pakhomov@itp.nsc.ru, web-сайт:  
[http://www.itp.nsc.ru/structura/nauchnye\\_porazdeleniya/22\\_laboratoriya\\_termogazodinamiki.html](http://www.itp.nsc.ru/structura/nauchnye_porazdeleniya/22_laboratoriya_termogazodinamiki.html)


Подпись Пахомова Максима Александровича  
удостоверяю.

Ученый секретарь ИТ СО РАН,  
к.ф.-м.н.

«08» февраля 2023 г.

  
М.С. Макаров



С отзывом ознакомлен 14.02.2023  8