

В диссертационный совет 24.2.327.08 на базе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4


«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора ИИВТ РАН
по научной работе, д.ф.-м.н.
Гавриков А.В.
« 16 » 02 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) 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.

Одной из важных прикладных задач современной аэродинамики является полёт на сверхзвуковых скоростях в плотных слоях атмосферы, в том числе преодоление летательным аппаратом зон с дисперсными включениями, которые могут находиться как в жидком, так и в твёрдом агрегатных состояниях, например, дождя, снега, облаков, пылевых бурь, участков с вулканической пылью. Наличие дисперсной примеси в воздушном потоке создаёт дополнительную тепловую и эрозионную нагрузку на поверхность летательного аппарата, которая должна учитываться уже на этапе его проектирования. Проведение натурных и стендовых испытаний при широком спектре атмосферных явлений различной природы сопряжено как с техническими сложностями, так и с высокой стоимостью, а порой, практически невозможно. В этой связи разработка математического аппарата и программного обеспечения для численного моделирования обтекания тел сверхзвуковым потоком газа с твёрдыми частицами, которой и посвящена представленная диссертация, является **актуальной** и имеет большую **практическую ценность**.

Необходимо отметить, что стремительный рост производительности вычислительных систем на текущем этапе обеспечивается, в первую очередь - увеличением объема памяти, числа процессоров, количества ядер процессора, построением гетерогенных систем с использованием графических ускорителей промышленного класса. В связи с этим одной из важнейших характеристик разрабатываемых алгоритмов и программ математического моделирования физических явлений выступает эффективное использование аппаратного обеспечения современных компьютеров посредством распараллеливания расчётов, в том

числе на графических процессорах, чему в диссертационной работе Способина А.В. уделяется немало внимания. Реализация многомасштабной модели решения системы уравнений газовой динамики, которая используется для расчёта газодинамического взаимодействия крупных частиц с ударным слоем, была бы попросту невозможна без активного применения параллельных вычислений, особенно, в трёхмерной постановке.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 313 страниц, в списке литературы 361 наименование, в том числе 72 работы автора по теме диссертации, из которых 25 – статьи в рецензируемых журналах, входящих в список рекомендованных ВАК изданий либо международные базы данных Web of Science и Scopus, 6 статей опубликованы автором единолично, получены свидетельства Роспатента на два объекта интеллектуальной собственности – программы для ЭВМ.

Во **введении** представлен обзор содержания каждой из глав работы, определены цели и задачи, обоснованы актуальность, научная значимость и новизна проводимых исследований.

Главы диссертации **с первой по третью** посвящены численному исследованию обтекания затупленного тела сверхзвуковым потоком запылённого газа и анализу влияния целого ряда разнородных факторов. Поэтапно разрабатывается комплексная математическая модель, включающая модель динамики дисперсной фазы, модель газовой динамики ударного слоя, модели нагрева и эрозионного разрушения преграды, а также модель распространения теплового излучения в двухфазном ударном слое.

Уравнения движения частиц учитывают силу аэродинамического сопротивления, силу Магнуса и вращающий момент. При расчёте нагрева частицы учитываются конвективный и радиационный тепловые потоки. Отличительной чертой разработанного подхода является прямое полномасштабное моделирование потока частиц, при котором каждая частица в вычислительном эксперименте соответствует одной физической, учитываются все столкновения частицы с преградой и другими частицами, что позволяет с минимальными допущениями изучать влияние вращения частиц и столкновений между ними на параметры течения в двухфазном ударном слое и интенсивность воздействия двухфазного потока на поверхность обтекаемого тела. Параметры частиц в момент столкновения определяются аппроксимацией траекторий их движения зависящими от времени пространственными кривыми второго порядка. Применительно к плоским двумерным газодинамическим полям разработаны алгоритмы оптимизации прямого численного моделирования динамики дисперсной фазы – «квазитрёхмерная» модель движения частиц с учётом столкновений.

Для дискретизации системы уравнений газовой динамики несущего газа, уравнения теплопроводности в разрушающемся теле и уравнения распространения излучения в запылённом потоке используется унифицированный подход на основе адаптивных

декартовых сеток, а также общий метод погруженной границы с фиктивными ячейками аппроксимации краевых условий на криволинейных подвижных границах. Применяется явная схема интегрирования системы уравнения газовой динамики, и неявная – при расчёте теплового излучения и распространения тепла внутри тела.

Исследуется влияние примеси на параметры газа в ударном слое. Отмечается сокращение отхода ударной волны и рост давления газа. Влияние частиц на температуру газа неоднозначно – торможение частиц в ударном слое сопровождается рассеянием кинетической энергии и способствует нагреву газа, после отскока от тела, замедлившиеся частицы несколько охлаждают газ вследствие конвективного теплообмена. Проявление отмеченных эффектов усиливается при росте концентрации примеси, а также уменьшении частиц в размере.

Столкновения между частицами приводят к образованию скоплений частиц и росту концентрации примеси в потоке газа вблизи обтекаемой поверхности, особенно, во фронтальной зоне со стороны набегающего потока. По мере роста концентрации набегающие частицы всё чаще сталкиваются с пребывающими вблизи поверхности, отклоняются от начальной траектории движения и теряют свою скорость, как следствие, снижается непосредственное ударное воздействие частиц на поверхность тела – возникает эффект «экрана». Накопление частиц вблизи поверхности способствует охлаждению газовой фазы и дополнительному нагреву дисперсной путём конвективного теплообмена, поглощению излучения от преграды в случае «горячей» поверхности, в результате возрастают тепловое излучение примеси и равновесная температура поверхности обтекаемого тела. Исследовано взаимодействие частиц полидисперсного состава, в том числе «бидисперсной» примеси частиц, включающей фракции двух характерных размеров.

Масса материала преграды, которую она теряет при каждом ударе частицы о поверхность, вычисляется согласно известной полуэмпирической модели, основанной на понятии эффективной энтальпии эрозионного разрушения. Разработана модель изменения геометрии тела, подверженного многочисленным ударам частиц. Граница тела представлена многогранником, эрозионное воздействие частиц за временной интервал суммируется, после чего рассчитывается смещение вершин многогранника в соответствии с унесённой массой. В проведённых расчётах особенно ярко проявился экранирующий эффект от столкновений между частицами, вследствие которого интенсивность эрозионного уноса снижалась вдвое. Интерес вызывает полученное в расчётах малое влияние учёта изменения геометрии преграды на суммарную интенсивность эрозионного уноса массы.

Наряду с обладающими несомненной научной новизной результатами комплексного исследования учёта влияния разнородных факторов на двухфазный ударный слой, научную ценность представляет и методическая часть работы. Разработан и прошёл верификацию подход на основе модельных частиц-представителей, каждая из которых соответствует

группе физических, в сочетании с прямым моделированием столкновений, что позволило расширить спектр решаемых задач и дало возможность моделировать трёхмерное движение примеси в осесимметричном газодинамическом поле. Проведено сопоставление результатов воздействия примеси на тело при использовании прямого полномасштабного расчёта столкновений между частицами со статистическим подходом на основе метода Монте-Карло.

Во второй половине диссертационной работы, в главах **с четвёртой по шестую**, построен соответствующий аппарат математического моделирования и проводится численное исследование физических эффектов, сопровождающих движение в сверхзвуковом ударном слое немногочисленных крупнодисперсных частиц. Такие частицы, обладая достаточной массой, при движении навстречу набегающему потоку после отражения от тела выходят за пределы ударного слоя и радикальным образом изменяют всю картину обтекания тела газовым потоком, что подтверждено целым рядом экспериментов.

На первом этапе, взяв за основу развитые в первой части диссертационной работы алгоритмы решения системы уравнений газовой динамики в цилиндрической системе координат на адаптивных декартовых сетках с подвижными границами, автор разрабатывает вычислительную модель движения одиночной крупной частицы навстречу набегающему сверхзвуковому потоку по оси симметрии затупленного тела. В роли преграды в проведённых расчётах выступают сфера и круговой цилиндр с плоским торцом, направляющие которого параллельны набегающему потоку. Особый интерес представляют впервые описанные в настоящей работе газодинамические процессы, сопровождающие выход частицы за пределы невозмущенного ударного слоя. При взаимодействии головной ударной волны со скачком уплотнения, вызванным движением частицы в сверхзвуковом потоке, образуется направленная на тело струя газа, создающая вблизи поверхности точку растекания, от которой часть газа устремляется к оси симметрии и формирует вихревое движение тороидальной формы. Вблизи точки растекания на поверхности тела кратно возрастают давление газа и конвективный тепловой поток к поверхности.

Для моделирования обтекания цилиндра с плоским торцом, в качестве входных данных, использовались параметры реальных стендовых испытаний. Полученные в расчётах картины течения и параметры газа показали очень хорошее согласование с экспериментальными. Моделирование позволило изучить механизмы возникновения колебательного режима течения, характеристики которого также соответствуют данным эксперимента.

Применив алгоритмы расчёта обтекания тела потоком вязкого газа к отдельным частицам и обеспечив согласование граничных условий, в **пятой** главе работы автор разрабатывает модель скользящих адаптивных декартовых сеток движения частиц в ударном слое вдоль сложных траекторий в плоской постановке. Несмотря на определённые

допущения, обусловленные двумерным характером модели, показана возможность локализации точки растекания в определённой области вблизи критической точки при движении частицы с отклонением от оси, а также увеличением продолжительности её существования при последовательном отражении от поверхности нескольких частиц. Явление сопровождается локальным ростом давления газа и конвективного теплового потока к поверхности.

Построение полностью корректной, с точки зрения физики, модели пространственного движения частиц в ударном слое требует рассмотрения всех процессов в трёхмерной постановке. Вследствие различия линейных размеров частиц и преграды на несколько порядков, решение системы уравнений Навье-Стокса на декартовых сетках с квадратными ячейками оказывается затруднительным ввиду большого расхода памяти компьютера. Для преодоления этих ограничений в **шестой** главе диссертации автор предлагает использовать бессеточный метод решения систем уравнений газовой динамики, основанный на МНК-аппроксимации частных пространственных производных и позволяющий оптимизировать потребление компьютерных ресурсов благодаря анизотропному распределению вычислительных узлов в пространстве. Предложены оригинальные алгоритмы моделированию обтекания газом движущихся тел на основе бессеточного подхода. Проведена верификация разработанных алгоритмов и программного кода на типовых задачах вычислительной гидродинамики. Разработанный программный код, использующий технологию распараллеливания OpenCL для переноса основной вычислительной нагрузки на графические процессоры, позволил в трёхмерном пространстве выполнить расчёты, аналогичные двумерным задачам из пятой главы, получить не только качественные, но и количественные оценки локальной интенсификации воздействия газа на поверхность тела. Рост давления и теплового потока достигал 3–4 раз, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

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

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. В диссертации представлены корректные постановки всех решаемых задач. Используются известные уравнения описания движения частиц и сплошной среды, распространения тепла и излучения. Полученные результаты являются внутренне непротиворечивыми и соответствуют общим физическим представлениям. Степень обоснованности научных положений и выводов соответствует принятой в рамках специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

В пользу **достоверности** полученных в работе результатов свидетельствует тщательный подход автора к постановке задач, разработке физически и математически корректных моделей, выбор известных методов и алгоритмов решения систем уравнений,

скрупулёзная проверка собственных алгоритмов и программного кода на тестовых задачах, сравнение результатов с расчётами других авторов и аналитическими выражениями, хорошее согласование с данными стендовых испытаний.

Научная новизна результатов диссертационной работы обусловлена оригинальностью и комплексным подходом к прямому полномасштабному моделированию обтекания преграды запылённым потоком с учётом широкого круга факторов (вращение, столкновение, излучение частиц, эрозионное разрушение преграды, влияние примеси на газ) и определению роли каждого из них, в первую очередь, с точки зрения воздействия на поверхность тела. Показана важность учёта столкновений между частицами даже при относительно невысокой концентрации примеси в набегающем потоке.

Разработаны новые многомасштабные вычислительные модели расчёта течения газа в ударном слое при наличии движущихся в потоке тел. С их помощью получены хорошо согласующиеся с экспериментом данные об изменениях структуры и параметров течения газа, которые могут быть вызваны даже одиночными частицами. Численное моделирование позволило в деталях изучить причины наблюдаемых в экспериментах явлений.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в университетах, академических и отраслевых институтах, занимающихся исследованием двухфазных течений и их практическими приложениями (ОИВТ РАН, ЦАГИ, ЦНИИМаш, ЦИАМ, ИПМех РАН, МАИ, МГТУ им. Баумана, МФТИ, БГТУ Военмех и др.).

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и **замечания**:

1. Для определения крупности (инерционности) частиц автор использует такие словосочетания «частицы мелкодисперсной примеси», «частицы среднего размера», «крупнодисперсные частицы». Понятно, что инерционность частиц определяется не только их размером (диаметром) и плотностью, а также скоростью набегающего потока и размером (диаметром) обтекаемого тела. Поэтому для определения инерционности частиц удобнее использовать безразмерный критерий – число Стокса, включающий все упомянутые параметры двухфазного потока.
2. Деление режимов на «столкновительные» и «бесстолкновительные» удобно производить с использованием столкновительного числа Стокса (отношение времени динамической релаксации частицы к характерному времени между столкновениями), методология использования которого хорошо развита в теории двухфазных потоков.
3. При расчёте столкновений частиц в диссертации используются различные величины коэффициента восстановления скорости $e_N=1$ (с. 103), $e_N=0,9$ (с. 86, с. 89, с. 92, с. 135, с. 140), $e_N=0,5$ (с. 101, с. 102), $e_N=0,17$ (с. 158, с. 168). Такой

большой разброс одной из важнейших характеристик процесса столкновения требует некоторого пояснения.

4. В диссертации отсутствует раздел «Основные условные обозначения». Это осложняет восприятие материала и приводит к использованию разных обозначений для одних и тех же величин.
5. Во всех выводах в заключении отсутствуют какие-либо числовые значения, что «смазывает» конкретику полученных результатов.
6. Хорошо было бы провести численное моделирование не только для условий имеющихся экспериментов, но и поварьировать основными параметрами с целью получения новых интересных результатов (сказанное относится, прежде всего, к главе 4).
7. Восприятие полученных результатов и их анализ осложнен использованием диссертантом малых значений абсолютного времени (например, $1,156 \cdot 10^{-3}$ с), за которое частица затормозилась в ударном слое, отразилась от поверхности, двигалась в обратном направлении, вышла за пределы ударного слоя, затормозилась, развернулась, вновь достигла поверхности и т.д. Полезно было бы привести некоторую схему движения частицы с указанием характерных участков ее траектории и использовать относительное время при анализе ее движения.

Заключение

Высказанные выше замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы, которая, безусловно, заслуживает положительной оценки. В целом можно заключить, что диссертация Способина Андрея Витальевича «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами» обладает внутренним единством и является завершённой научно-исследовательской работой, которая имеет важное научное и практическое значение. Совокупность научных положений в области исследования запылённых потоков, полученных в диссертации посредством разработанных оригинальных математических моделей, можно квалифицировать как крупное научное достижение. Тема диссертации соответствует паспорту указанной специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Все основные результаты диссертационной работы **апробированы** на большом числе российских и международных научных конференций. Количество публикаций автора по теме работы удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно текущей редакции Положения о присуждении учёных степеней. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Ссылки на источники в тексте диссертации и автореферата указаны корректно.

Диссертация Способина А.В. и настоящий отзыв на неё обсуждались и были одобрены на заседании научного семинара лаборатории №8 ОИВТ РАН (протокол №1 от 06.02.2023 г.). Было отмечено соответствие работы уровню докторской диссертации, а темы работы – профилю ведущей организации. Диссертация рекомендована к защите. Высказанные замечания отражены в настоящем отзыве.

По научному уровню полученных результатов, своему содержанию и оформлению диссертационная работа «Численное моделирование обтекания тел сверхзвуковыми потоками с твёрдыми частицами» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе 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 безусловно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий лаборатории №8 физического моделирования
двухфазных течений ОИВТ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

А.Ю. Вараксин

Подпись А.Ю. Вараксина заверяю
Заместитель директора ОИВТ РАН

Н.Н. Иванова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

Интернет-страница: <http://www.jiht.ru>

Телефон: +7 (495) 485-8345

Адрес электронной почты: office@ihed.ras.ru

С отзывом согласован 16.02.2023