

На правах рукописи

ГОЛУБКИНА Ирина Валерьевна

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗЕ

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета и в лаборатории механики многофазных сред Института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук А.Н. Осипцов
Научный консультант:	кандидат физико-математических наук В.И. Сахаров
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук профессор А.Б. Ватажин доктор физико-математических наук Ю.В. Туник
Ведущая организация:	Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва)

Защита состоится 3 декабря 2010 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, аудитория 16-24.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «___» октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.89,
доктор физико-математических наук

А.Н. Осипцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность исследования течений дисперсных сред при наличии сильных разрывов (ударных волн, контактных поверхностей и их комбинаций) обусловлена многочисленными приложениями в аэродинамике (движение сверхзвуковых летательных аппаратов в газопылевых и аэрозольных облаках, течения топливных смесей в соплах ракетных двигателей, распространение взрывных и детонационных волн в загрязненной атмосфере), промышленных технологиях (производство порошковых материалов, нанесение покрытий), медицине (безыгольное введение подкожных инъекций), нефте- и угледобывающей промышленности (технология гидроразрыва, распространение ударных волн при взрывах в угольных шахтах) и др. Наличие дисперсной примеси может существенно изменить структуру газодинамических разрывов и общие свойства течения, что может приводить как к негативным последствиям (например, разрушению обшивки летательных аппаратов и стенок сверхзвуковых каналов при механическом и тепловом воздействии твердых частиц на поверхность; снижению эффективности газотурбинных установок), так и быть источником эффектов, полезных с точки зрения технических приложений (например, формированию коллимированных пучков микрочастиц, используемых для резки материалов или введения подкожных инъекций).

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных различным аспектам течений с ударными волнами в многофазных средах, ряд важных проблем остаются незатронутыми либо изученными недостаточно подробно. Одной из таких проблем является возникновение так называемых волн с полной дисперсией, т. е. локализованных в пространстве волн сжатия, в которых поля параметров обеих фаз не испытывают разрыва. В то время как структура одиночной волны с полной дисперсией достаточно хорошо изучена в литературе, более сложные схемы течения при наличии таких волн практически не исследовались. В данной работе рассматривается взаимодействие плоских волн сжатия в стационарном потоке и определяются условия, при которых все либо только некоторые из входящих или исходящих волн вырождаются в волны с полной дисперсией.

Вторым направлением работы является исследование эффектов фокусировки инерционных дисперсных частиц, проявляющихся при взаимодействии ударных волн в запыленном газе. Газодинамические разрывы делят поле течения на области с резко различающимися свойствами несущей фазы. Поскольку в запыленном газе дисперсные частицы обычно высокоинерционные и их параметры изменяются не так быстро, как параметры несущего газа, то в потоке могут возникать зоны, где рассогласование скоростей фаз достаточно велико. Кроме того, возможно появление областей, в которых траектории частиц пересекаются, образуя многослойные струк-

туры, известные в литературе как «складки», «пелены» и «шнуры» (Крайко А.Н., 1979; Осипцов А.Н., 1984). При моделировании высокоскоростных аэродисперсных течений необходимо учитывать все упомянутые эффекты и применять адекватные численные методы, позволяющие корректно рассчитывать поля скоростей и концентрации частиц.

В большинстве работ, посвященных течениям многофазных сред с ударными волнами, отсутствует аккуратный расчет поля концентрации частиц. Обычно применяются стандартные подходы, не учитывающие возможность пересечения траекторий частиц (эйлеров подход, метод трубок тока). Применение этих методов обосновано в случаях, когда частицы малоинерционные и отклонение их траекторий от линий тока несущей фазы невелико. Однако в случае достаточно инерционных частиц, использование стандартных подходов часто приводит к некорректным результатам при расчете поля концентрации дисперсной фазы.

В диссертации для расчетов параметров дисперсной фазы используется полный лагранжев подход (Осипцов А.Н., 1998), который основан на решении уравнения неразрывности дисперсной фазы в лагранжевых переменных и привлечении дополнительных уравнений для компонентов якобиана перехода от эйлеровых переменных к лагранжевым. Указанный метод позволяет рассчитывать с контролируемой точностью структуру областей пересекающихся траекторий и зон накопления частиц.

В работе полный лагранжев подход используется для исследования эффекта фокусировки частиц, возникающей за точкой взаимодействия ударных волн в стационарном запыленном потоке. Для создания кумулятивных струй частиц обычно используются специально организованные струйные течения со сходящимися линиями тока несущей фазы, а также так называемые «аэродинамические линзы» – каналы с резко переменным сечением, позволяющие собирать инерционные дисперсные частицы в узкий направленный пучок. Схема аэродинамической фокусировки частиц при взаимодействии ударных волн, рассматриваемая в диссертации, является новой, отличной от известных в литературе. В работе проводится детальное параметрическое исследование характера фокусировки частиц при различных режимах взаимодействия волн.

Локальные области накопления частиц могут возникать и в течениях с более сложной конфигурацией взаимодействующих ударных волн. Одним из таких течений, представляющих самостоятельный интерес, является обтекание затупленного тела гиперзвуковым потоком запыленного газа при наличии косоугольного скачка уплотнения, падающего на головную ударную волну. Эта проблема актуальна в связи с изучением высокоскоростного движения летательных аппаратов в газопылевых облаках, при котором указанное взаимодействие может иметь место на краях воздухозаборников и других

выступающих частей конструкций. Поскольку при таких конфигурациях течения интенсивность тепловых потоков в локальных точках поверхности может достигать аномально высоких значений даже в чистом газе, то актуален вопрос, в какой степени присутствие твердых частиц в набегающем потоке может дополнительно способствовать интенсификации теплообмена и возрастанию тепловых потоков к обтекаемой поверхности. В работе рассматривается сверхзвуковое обтекание плоского цилиндра слабозапыленным потоком газа при наличии косога скачка, приходящего на головную ударную волну. Проводится исследование влияния приходящего скачка уплотнения на изменение характера движения частиц и распределение тепловых потоков со стороны дисперсной фазы по сравнению со случаем симметричного обтекания цилиндра сверхзвуковым запыленным потоком.

Основные цели работы:

- исследование условий возникновения волн с полной дисперсией при взаимодействии плоских скачков уплотнения в стационарном потоке запыленного газа;
- численное исследование структуры течения в окрестности точки взаимодействия плоских ударных волн и волн с полной дисперсией;
- численное исследование сверхзвуковых течений дисперсной фазы с локальными зонами накопления частиц и наличием пересекающихся траекторий дисперсной фазы на основе применения полного лагранжева подхода;
- параметрическое исследование эффекта аэродинамической фокусировки инерционных частиц в области взаимодействия плоских стационарных ударных волн;
- изучение влияния примеси твердой фазы на распределение тепловых потоков на поверхности плоского цилиндра, обтекаемого сверхзвуковым потоком запыленного газа при наличии падающего косога скачка, взаимодействующего с головной ударной волной.

Достоверность результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертации, обусловлена использованием строгих математических моделей механики гетерогенных сред. В численных алгоритмах применялись хорошо известные и апробированные методы. Численные процедуры были тщательно проверены на различных тестовых задачах, что гарантирует их корректность и оптимальность. Точность расчетов подтверждается сравнением результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты, выносимые на защиту:

- Проведено исследование взаимодействия плоских ударных волн в стационарном запыленном потоке и определены области безразмерных определяющих параметров, при которых входящие и/или исходящие волны вырождаются в волны с полной дисперсией.
- В рамках двухскоростной модели запыленного газа проведено численное исследование структуры течения в области взаимодействия ударных волн и волн с полной дисперсией.
- С применением полного лагранжева подхода исследовано движение и поле концентрации частиц в течениях несущей фазы, содержащих системы газодинамических разрывов.
- Обнаружен и детально исследован эффект аэродинамической фокусировки частиц, возникающей за точкой взаимодействия плоских скачков уплотнения в потоке грубодисперсной газозвеси. Определены параметры частиц и набегающего потока, при которых реализуется оптимальная фокусировка частиц.
- Проведен анализ увеличения локальных тепловых потоков, обусловленного фокусировкой дисперсных частиц в ударном слое около плоского цилиндра при взаимодействии косога скачка уплотнения с головной ударной волной.

Практическая значимость. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для развития технологий фокусировки и сепарации частиц в дисперсных потоках, при проектировании тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов. Кроме того, полученные результаты могут объяснить феномены исчезновения разрывов и возникновения размытых структур (волн с полной дисперсией) в неоднородных течениях запыленного газа с взаимодействующими ударными волнами.

Созданный в процессе работы над диссертацией комплекс компьютерных программ может быть использован для расчетов полей скорости, температуры и концентрации дисперсных частиц в течениях несущей фазы, содержащих системы взаимодействующих газодинамических разрывов.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Конференции-конкурсе молодых ученых Института механики МГУ (2005, 2006, 2009, 2010); Конференции МГУ «Ломоносовские чтения» (2007, 2009, 2010); VIII молодежной школе-конференции «Лобачевские чтения» (Казань, 2009); XV

и XVI школе-семинаре «Современные проблемы гидроаэродинамики» (Сочи, 2007, 2010); IX и X международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2009, 2010); XVII школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена» (Жуковский, 2009); Всероссийской конференции «Механика и химическая физика сплошных сред» (Бирск, 2007); Всероссийской конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной 100-летию акад. Л.И. Седова (Москва, 2007); XIX Международном симпозиуме по процессам переноса ISTP-19 (Рейкьявик, 2008).

За доклад «Фокусировка инерционных частиц за точкой пересечения скачков уплотнения», представленный на конференции «Механика и химическая физика сплошных сред» (Бирск, 2007), автор удостоен диплома I степени. За работу «Аэродинамическая фокусировка инерционных частиц в зонах взаимодействия ударных волн», вошедшую в состав диссертации, автор удостоен диплома 3-й степени по результатам Конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ в 2006 г.

Результаты работы обсуждались также на специализированных научных семинарах: семинаре кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 2006–2009), семинаре по механике многофазных сред под руководством д.ф.-м.н. А.Н. Осипцова (НИИ механики МГУ, Москва, 2004–2010), семинаре под руководством акад. А.Г. Куликовского, проф. А.А. Бармина, проф. В.П. Карликова (НИИ механики МГУ, Москва, 2010).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты работы изложены в 19 научных публикациях, из которых 12 – статьи в журналах и сборниках и 7 – тезисы докладов. Статьи [6], [13], [15] и [19] опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК на момент публикации. Часть работ написаны совместно с научным руководителем А.Н. Осипцовым и научным консультантом В.И. Сахаровым. Во всех работах соискателю принадлежит участие в постановке задачи, разработка алгоритмов решения, численное моделирование, анализ результатов. Все положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 30 рисунков, 1 таблица и 142 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 118 страниц.

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертации, основные цели и направления исследований, указана научная и практическая ценность работы.

В **Главе 1** представлен обзор литературы, посвященной течениям запыленного газа при наличии сильных разрывов в поле несущей фазы и обтеканию затупленных тел аэродисперсным потоком. Описаны основные этапы исследований, начиная с пионерских работ авторов Carrier G.F., Marble F., Rudinger G., Kriebel A.R., Нигматулин Р.И., Крайко А.Н., в которых изучена структура прямых ударных волн в гетерогенных средах, и заканчивая численным анализом сложных двухфазных течений с системами ударных волн и контактных разрывов (Miura H., Glass I.I., Saito T., Takayama K., Федоров А.В., Киселев С.П. и др.). Обсуждается влияние различных факторов (таких как инерционность и массовая концентрация дисперсных частиц, свойства несущей фазы, внешние условия течения и пр.) на структуру ударных волн в потоке запыленного газа (Ben-Dor G., Igra O.). Приводится ряд работ, посвященных исследованию одиночных волн с полной дисперсией, в их числе теоретические работы авторов Rudinger G., Guha A., Namad H., Frohn A., а также классическая работа Quta E. *et al.* (1976), в которой экспериментально установлена возможность возникновения волн с полной дисперсией в запыленном газе. Перечислены различные известные в литературе конфигурации течений запыленного газа, в которых возможен эффект аэродинамической фокусировки частиц (Murphy W.K., Sears G.W., Israel G.W., Fridlender S.K., Dahneke B.E., Fernandez de la Mora, Liu P., Ziemann P.L., Zhang X., Akhatov I.S. и др.).

Отмечены основные достижения в исследовании взаимодействия косо-го скачка уплотнения с головной ударной волной около затупленного тела в однородном потоке газа (Edney B.E., Тетерин М.П., Боровой В.Я., Wieting A.R., Holden M.S., Hains F.D., Keyes J.W., Tannehill J.C. и др.).

Цитируются работы Осипцова А.Н., Циркунова Ю.М., Василевского Э.Б., Полежаева Ю.В., Михатулина Д.С. и др., посвященные исследованию движения твердых частиц и оценке их влияния на увеличение тепловых нагрузок на поверхность затупленных тел, обтекаемых сверхзвуковым запыленным потоком.

На основе обзора литературы сделан вывод, что проблема возникновения волн с полной дисперсией рассматривалась только для простейших типов течений запыленного газа, однако более сложные конфигурации с такими волнами практически не исследовались. Отмечено также, что в абсолютном большинстве численных расчетов дисперсных потоков с системами ударных волн не учитывается возможность пересечения траекторий частиц, тогда как такие ситуации могут иметь место в случаях достаточно инерционных частиц в течениях с разрывами параметров несущей фазы.

В **Главе 2** изложена математическая модель запыленного газа, основанная на приближении взаимопроникающих континуумов. Используются стандартные предположения модели запыленного газа: двухфазная среда

состоит из несущей и дисперсной фаз. Несущая фаза – совершенный газ с постоянными теплоемкостями c_p и c_v . Дисперсная фаза – множество твердых сферических частиц с одинаковым радиусом σ^* , массой m и теплоемкостью c_s . Частицы обтекаются в режиме сплошной среды, столкновения и броуновское движение в среде частиц отсутствуют. Объемная доля частиц мала, поэтому не учитываются поправка к вязкости и эффект вытеснения несущей фазы. В межфазном обмене импульсом и энергией участвуют только сила аэродинамического сопротивления частиц и межфазный поток тепла. Вязкость и теплопроводность несущей фазы (за исключением Главы 5) учитываются лишь на микромасштабе частицы.

Используя в качестве характерных масштабов параметры однородного невозмущенного потока и некоторый масштаб длины L , для стационарного течения законы сохранения массы, импульса и энергии несущей и дисперсной фаз можно записать в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) &= 0 \\ \rho(\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} &= -\frac{1}{\gamma M_0^2} \nabla p - \alpha \beta n_s \mu (\mathbf{V} - \mathbf{V}_s) C_f \\ \rho(\mathbf{V} \nabla) T &= \frac{\gamma - 1}{\gamma} (\mathbf{V} \nabla) p - \frac{2}{3} \frac{\alpha \beta}{\operatorname{Pr}} n_s \lambda (T - T_s) C_q + \alpha \beta n_s \mu (\gamma - 1) M_0^2 (\mathbf{V} - \mathbf{V}_s)^2 C_f \\ p &= \rho T \\ \mu &= \lambda = T^{0.76} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho_s \mathbf{V}_s) &= 0 \\ (\mathbf{V}_s \nabla) \mathbf{V}_s &= \beta \mu (\mathbf{V} - \mathbf{V}_s) C_f \\ (\mathbf{V} \nabla) T_s &= \frac{2}{3} \frac{\beta}{\chi \operatorname{Pr}} \lambda (T - T_s) C_q \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь индексом s обозначены параметры дисперсной фазы, ρ , \mathbf{V} , p , T – плотность, скорость, давление и температура, μ , λ – динамическая вязкость и теплопроводность газа, n_s – числовая концентрация частиц. Выражения для межфазных сил и теплообмена (поправочные коэффициенты C_f и C_q , учитывающие конечность чисел Рейнольдса и Маха обтекания частиц) взяты в форме Карлсона-Хогланда, что позволяет рассматривать широкий диапазон условий обтекания частиц. В зонах возможных пересечений траекторий частиц («складок») следует вводить столько континуумов частиц, сколько слоев у «складки», а воздействие от частиц на несущую фазу суммировать по числу слоев.

Уравнения (1)-(2) содержат безразмерные параметры: число Маха несущей фазы в невозмущенном потоке M_0 , показатель адиабаты γ , число

Прандтля Pr , относительную массовую концентрацию частиц α , параметр инерционности частиц (обратное число Стокса) $\beta = L/l_\tau$ (здесь l_τ – длина скоростной релаксации при стоксовском законе обтекания частиц), отношение теплоемкостей вещества фаз $\chi = c_s/c_p$ и максимальное число Рейнольдса обтекания частиц Re_{s0} , входящее в выражения для C_f и C_q .

В **разделе 2.2** изложен полный лагранжев метод, разработанный А.Н. Осипцовым (см. например «*Проблемы современной механики. К 85-летию акад. Г.Г. Черного*», МГУ, 2010, с. 390-407) и успешно применяемый во многих работах для расчета параметров дисперсной фазы в течениях с пересекающимися траекториями частиц. Основная идея метода состоит в использовании лагранжевой формы законов сохранения дисперсной фазы и привлечении дополнительных уравнений для компонент якобиана перехода от эйлеровых к лагранжевым переменным. Эти уравнения совместно с уравнениями движения и теплопереноса в среде частиц, записанные для фиксированной траектории частиц, составляют замкнутую систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение данной системы позволяет вычислять все параметры частиц, включая концентрацию, вдоль выбранных траекторий частиц, что делает возможным исследование течений с множественными пересечениями траекторий и локальными зонами накопления частиц.

В **Главе 3** исследуются стационарные одно- и двумерные течения запыленного газа с конечной массовой концентрацией частиц при наличии волн с полной дисперсией – волн сжатия, в которых отсутствует разрыв в полях параметров несущей фазы. При этом равновесные параметры перед и за волной связаны условиями Рэнкина-Гюгонио для «эффективного газа» – фиктивной среды с суммарной плотностью и «эффективными» теплофизическими свойствами. В **разделе 3.1** для установления критериев существования волн с полной дисперсией предполагается, что области неравновесного течения малы по сравнению с характерным масштабом длины, что позволяет на макромасштабе использовать односкоростную однотемпературную модель «эффективного газа». Показано, что уравнения для «эффективного газа» совпадают с обычными уравнениями Эйлера для совершенного газа, но с измененными параметрами подобия (числом Маха и показателем адиабаты), поэтому анализ глобальных свойств течений запыленного газа может быть проведен с использованием известных результатов классической газовой динамики.

Безразмерные параметры «эффективного газа» выражаются следующим образом:

$$\gamma_{ef} = \gamma \frac{1 + \alpha\chi}{1 + \alpha\gamma\chi}, \quad M_{ef0}^2 = M_0^2 \frac{(1 + \alpha)(1 + \alpha\gamma\chi)}{1 + \alpha\chi} \quad (3)$$

Из последнего соотношения следует, что $M_{ef} \geq M$. Следовательно, в

запыленном газе возможны течения, в которых $M_{ef} > 1$, но $M < 1$, то есть течения, которые, будучи рассмотренными на масштабах, много больших длин скоростной и тепловой релаксации фаз, имеют свойства сверхзвуковых потоков, а по сути, являются дозвуковыми течениями, в которых не возникает разрывов параметров несущей фазы. Условия существования данного режима течения можно переписать в виде

$$\frac{1 + \alpha\chi}{(1 + \alpha)(1 + \alpha\gamma\chi)} < M_0^2 \leq 1$$

Данному условию и соответствуют решения типа волн с полной дисперсией. В случае косых волн следует рассматривать числа Маха, посчитанные по нормальной к волне компоненте скорости.

Для анализа условий возникновения волн с полной дисперсией используются соотношения Рэнкина-Гюгонио на косых скачках для «эффективного газа». При симметричном взаимодействии плоских стационарных волн уплотнения, падающих под углом φ_0 , в пространстве параметров $M_0, \gamma, \varphi_0, \alpha, \chi$ определяется множество, соответствующее «эффективным» параметрам $M_{ef0}, \varphi_0, \gamma_{ef}$, при которых существует решение задачи о регулярном взаимодействии скачков уплотнения. Затем оцениваются «замороженные» числа Маха падающей и отраженной волны и определяются критерии, при которых волнами с полной дисперсией являются: а) все взаимодействующие волны, б) только исходящие волны, в) только приходящие волны. На рис. 1 в плоскости параметров M_0, α при фиксированных $\chi = 1, \gamma = 1.4$ для некоторых значений угла φ_0 изображены области, отвечающие трем указанным режимам.

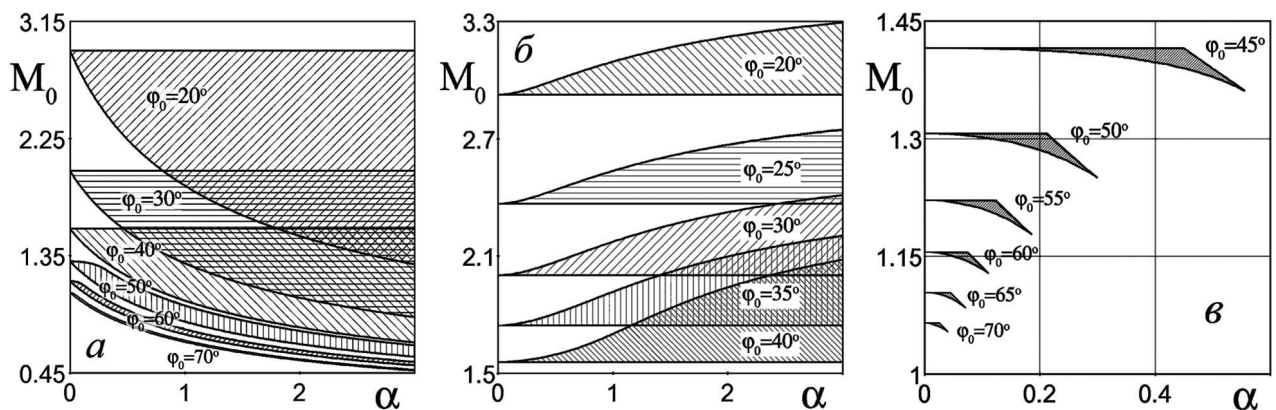


Рис. 1: Области параметров, соответствующие симметричному взаимодействию волн, при котором волнами с полной дисперсией являются: все волны (а), только исходящие волны (б), только приходящие волны (в).

Наряду с симметричным течением было рассмотрено несимметричное регулярное взаимодействие волн уплотнения. Установлено, что существу-

ют диапазоны определяющих параметров $M_0, \varphi_0, \psi_0, \alpha$ (φ_0, ψ_0 – углы между набегающим потоком и приходящими волнами), соответствующие всем возможным комбинациям из ударных волн и волн с полной дисперсией, в том числе комбинациям, в которых только одна из приходящих/отраженных волн вырождается в волну с полной дисперсией. Детали данного анализа довольно громоздки и здесь не приводятся.

Следует отметить, что появление волн с полной дисперсией возможно в течениях с небольшими числами Маха (околозвуковых течениях) при значительных массовых концентрациях частиц. Проведенное в данном разделе исследование позволяет объяснить возможное «исчезновение» отраженных ударных волн и превращение их в размытые структуры (волны с полной дисперсией) в сложных течениях запыленного газа с взаимодействующими разрывами.

В разделе 3.2 в рамках двухскоростной двухтемпературной модели численно исследуется структура прямой волны с полной дисперсией, а также течение в области симметричного взаимодействия волн для режимов а) и б). Численное решение системы уравнений для газа и частиц (1)-(2), дополненной производными по времени, найдено методом установления с применением двухшаговой явной схемы Мак-Кормака, в результате чего построены поля скоростей, температур и плотностей фаз. Показано, что расстояние, на котором происходит релаксация параметров фаз в волне с полной дисперсией, может на порядок превышать ширину зоны неравновесного течения за обычной ударной волной в запыленном газе, однако с увеличением массовой концентрации частиц ширина волны значительно сокращается. Найдены значения параметров, при которых температура газа «внутри» прямой волны с полной дисперсией меняется немонотонно и имеет выраженный локальный максимум.

На основании численных расчетов проведено качественное сравнение структуры течения при взаимодействии волн в случаях, когда все волны имеют полную дисперсию и когда только отраженные волны вырождаются в волны с полной дисперсией. Установлено, что в последнем случае за точкой взаимодействия волн вблизи оси симметрии существует узкая зона, в которой параметры фаз отличны от равновесных значений, соответствующих модели «эффективного газа». В этой зоне имеет место локальное увеличение концентрации частиц. В то же время ввиду малого рассогласования скоростей фаз в волнах с полной дисперсией пересечения траекторий частиц в рассмотренных конфигурациях не происходит, что оправдывает использование эйлерова подхода для расчета параметров частиц.

Глава 4 посвящена исследованию аэродинамической фокусировки инерционных частиц, возникающей за точкой пересечения плоских стационарных скачков уплотнения при умеренных и больших значениях числа Маха

и малых массовых концентрациях частиц. Влиянием частиц на параметры несущей фазы пренебрегается. Исследовано как симметричное, так и несимметричное взаимодействие ударных волн. В первом случае рассмотрены режимы регулярного и нерегулярного взаимодействия с прямой маховской «ножкой», в последнем – только регулярное. Для нахождения параметров несущей фазы в рассмотренных задачах используются известные решения классической газовой динамики. В **разделе 4.1** описан алгоритм вычисления параметров несущей фазы, постоянных в каждой из областей, ограниченных плоскими газодинамическими разрывами. С использованием условий непрерывности потоков массы, импульса и энергии на разрывах задача нахождения параметров газа сводится к решению системы алгебраических уравнений, причем в случае симметричного течения безразмерные параметры за ударными волнами могут быть выражены аналитически через число Маха набегающего потока M_0 , показатель адиабаты γ и углы падения волн φ_0 и ψ_0 . При постоянном значении $\gamma = 1.4$ найдены области определяющих параметров M_0, φ_0, ψ_0 , отвечающие каждому из рассматриваемых режимов.

В **разделе 4.2** проводится анализ распределения траекторий, скоростей и концентрации частиц для различных свойств несущей и дисперсной фазы. В качестве линейного масштаба использовалась длина скоростной релаксации частиц l_τ . Расчет полей параметров частиц осуществлялся с применением полного лагранжева подхода. В качестве лагранжевой координаты использовалась ордината начала траектории y_0 на падающей ударной волне. Для фиксированного значения y_0 уравнения для нахождения всех параметров дисперсной фазы представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений восьмого порядка, которая решалась для выбранных траекторий методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Концентрация частиц находилась из уравнения неразрывности в лагранжевой форме.

На основе результатов численного моделирования сделан вывод, что в широком диапазоне определяющих параметров $M_0, \varphi_0, \psi_0, Re_{s0}$ за отраженными ударными волнами существуют зоны, в которых происходит пересечение траекторий частиц (см. рис. 2). Числовая концентрация частиц в таких зонах возрастает в несколько раз по сравнению с остальной областью, а в крайних точках областей неоднозначности концентрация возрастает неограниченно (рис. 3). В то же время сингулярность числовой концентрации частиц относится к интегрируемому типу. Как показано в работе *Осипцов А.Н., 1984, МЖГ, №3, С. 46-52*, в таких случаях среднее расстояние между частицами остается конечным, и при небольших значениях объемной доли дисперсной примеси ($\lesssim 10^{-5}$) модель несталкивающихся частиц остается применимой.

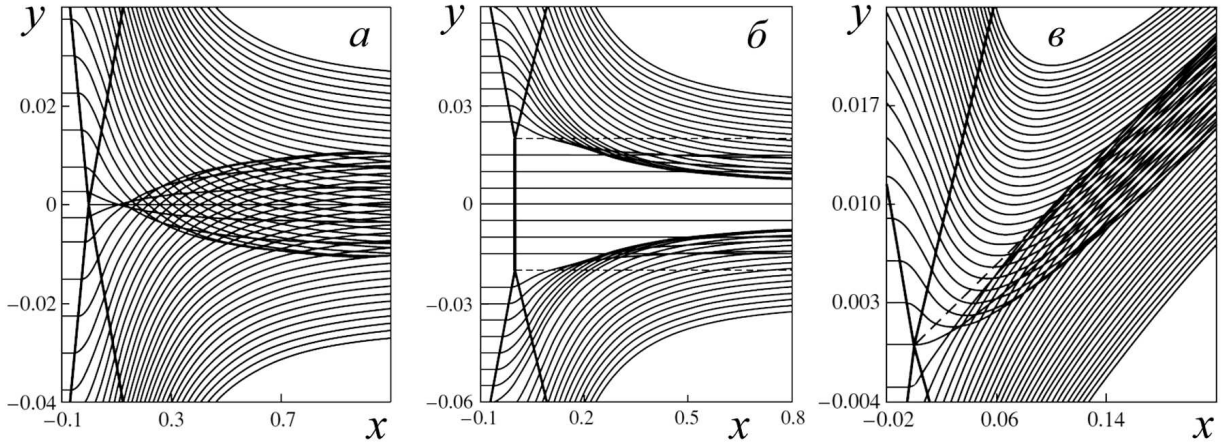


Рис. 2: Траектории частиц для режимов взаимодействия: *a* – регулярного симметричного ($M_0 = 5$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $Re_{s0} = 100$), *б* – маховского симметричного ($M_0 = 5.39$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $Re_{s0} = 100$), *в* – регулярного несимметричного ($M_0 = 8$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $\psi_0 = 40^\circ$, $Re_{s0} = 500$)

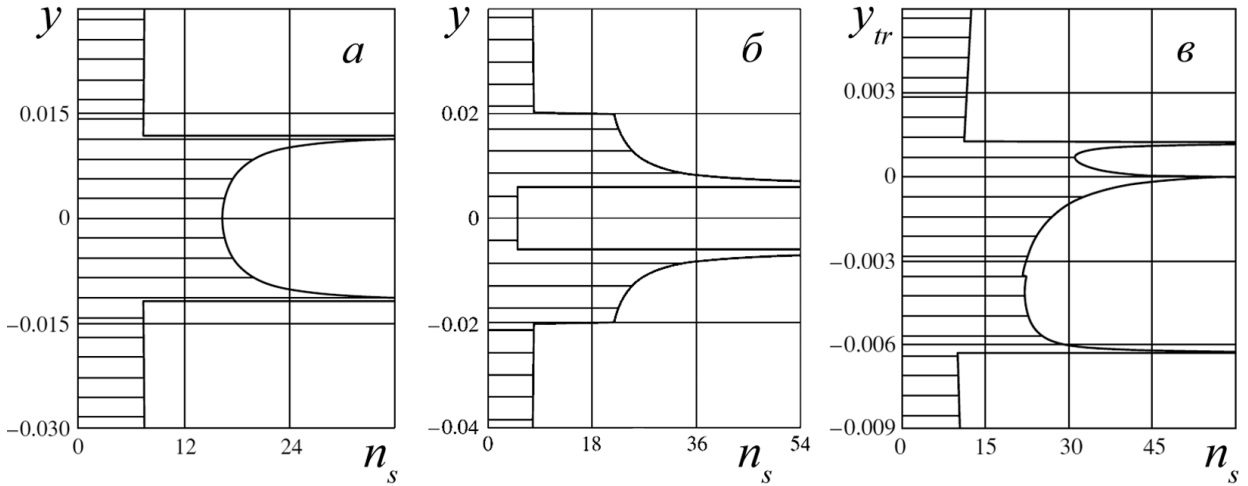


Рис. 3: Профиль числовой концентрации частиц за точкой взаимодействия волн в сечении, где рассогласование скоростей фаз пренебрежимо мало (y_{tr} – расстояние до тангенциального разрыва). Рисунки *a-в* соответствуют режимам, изображенным на рис. 2.

В случае симметричного (как регулярного, так и маховского) взаимодействия волн в каждой точке области пересекающихся траекторий существуют три различных значения параметров дисперсной фазы, тогда как в несимметричном случае – от двух до четырех, в зависимости от условий течения. В качестве истинного значения числовой концентрации частиц в расчетах берется сумма значений на всех траекториях, проходящих через данную точку.

Для исследования эффекта аэродинамической фокусировки частиц в **разделе 4.3** введен параметр фокусировки $\delta = D/d$, где $2D$ и $2d$ – начальная и конечная ширина трубки тока дисперсной фазы, все частицы из которой приходят в область неоднозначности (рис. 4). Параметр фокусировки характеризует степень сжатия потока инерционных частиц в результате

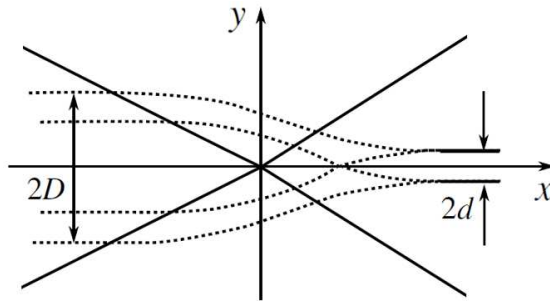


Рис. 4: Схема аэродинамической фокусировки частиц

взаимодействия скачков. Зависимость ширины области неоднозначности d и параметра фокусировки частиц δ от числа Маха M_0 и максимального числа Рейнольдса обтекания частиц Re_{s0} показана на рис. 5 и 6. Эффект фокусировки наиболее ярко выражен в случае маховского режима взаимодействия волн. Ширина области пересекающихся траекторий достигает наибольших значений при умеренных значениях числа Маха проходящих волн и при $Re_{s0} \sim 10$. Установлено, что при регулярном взаимодействии волн небольшой интенсивности и малых отклонениях закона сопротивления частиц от стоксовского реализуется оптимальный режим фокусировки частиц, когда конечный объем дисперсной фазы «схлопывается» в поверхность.

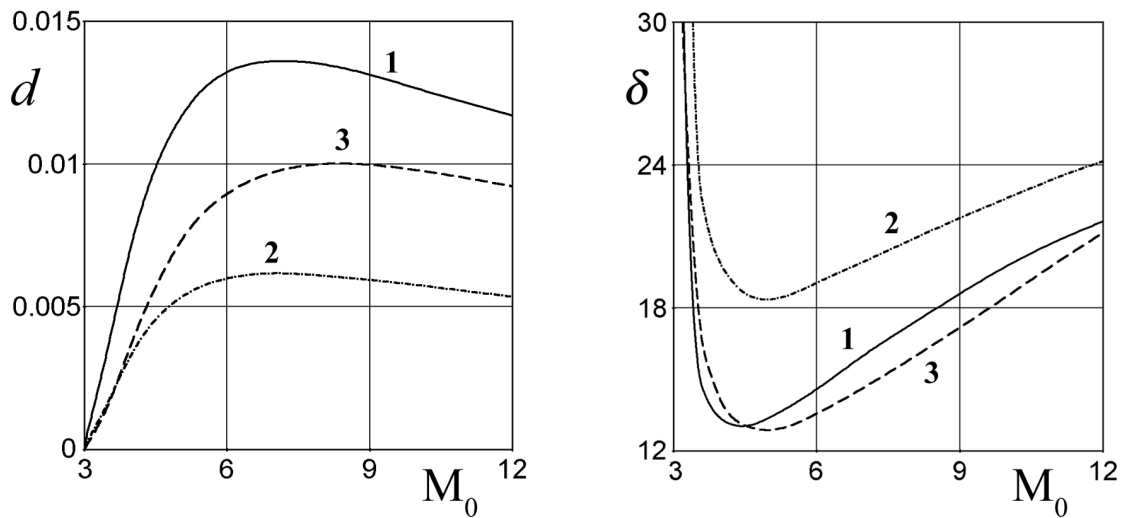


Рис. 5: Зависимость ширины области неоднозначности и параметра фокусировки от числа Маха падающей ударной волны при $Re_{s0} = 100$ для режимов взаимодействия: регулярного симметричного – 1, маховского симметричного – 2, регулярного несимметричного – 3.

Изученная новая схема аэродинамической фокусировки дисперсной фазы при взаимодействии ударных волн может быть использована для развития технологий, использующих фокусированные пучки аэрозольных частиц (нанесение покрытий, резка материалов и пр.).

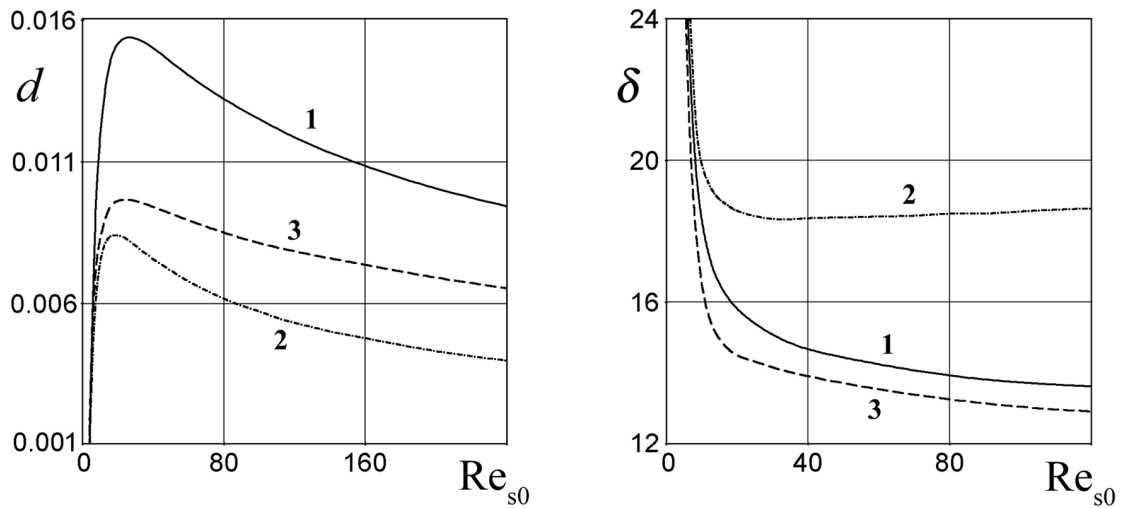


Рис. 6: Зависимость безразмерной ширины области неоднозначности и параметра фокусировки от числа Рейнольдса обтекания частиц при $M_0 \approx 5.39$, $\varphi_0 + \psi_0 = 60^\circ$. Обозначения для кривых 1-3 те же, что и на рис. 5.

Глава 5 посвящена изучению движения дисперсных частиц в ударном слое и оценке их влияния на тепловые потоки к поверхности плоского затупленного тела, обтекаемого стационарным гиперзвуковым слабозапыленным потоком в условиях, когда на головную ударную волну падает косой скачок уплотнения. Рассмотрены III и IV режимы взаимодействия волн (по стандартной классификации Edney E.V., 1968), при которых поверхность тела испытывает максимальные тепловые нагрузки со стороны несущей фазы.

В **разделе 5.1** рассмотрена математическая модель течения вязкого теплопроводного совершенного газа с твердыми включениями. Массовая концентрация частиц мала, и их влиянием на несущую фазу пренебрегается. Для нахождения распределения параметров газа в ударном слое около круглого плоского цилиндра использовались полные уравнения Навье-Стокса, численное решение которых осуществлялось методом установления по времени с использованием неявной «квазимонотонной» конечно-разностной схемы, построенной методом контрольных объемов. Подробности численного метода изложены в работе Громов В.Г., Сахаров В.И., Фатеева Е.И. «Применение модели частичного химического равновесия для исследования задач гиперзвуковой аэродинамики», препринт N 58-2000, Ин-т механики МГУ им. М.В. Ломоносова, 2000. Использовалась многоблочная неравномерная сетка, сгущающаяся в областях больших градиентов течения. Большая часть расчетов выполнена на сетках размерностью 200x160.

Были проведены расчеты параметров несущей фазы в условиях III и IV режимов взаимодействия ударных волн при значениях определяющих параметров: $M_0 = 6$, $Re = 2.25 \cdot 10^5$, $Pr = 0.7$, $\gamma = 1.4$, $T_w = 1$ (Re – число

Рейнольдса, вычисленное по радиусу цилиндра и параметрам набегающего потока, T_w – безразмерная температура стенки). Два рассматриваемых случая различаются только положением косого скачка уплотнения относительно цилиндра.

Траектории и поля параметров дисперсной фазы были рассчитаны с применением полного лагранжева подхода для широкого диапазона значений параметров инерционности частиц. Пространственные производные параметров газа в узлах эйлеровой сетки вычислялись по интерполяционным формулам второго порядка точности через производные по направлениям вдоль сеточных линий. Для вычисления параметров газа и их производных внутри ячеек была использована билинейная интерполяция сеточных значений. Результаты численного моделирования, представленные в **разделе 5.2**, показали, что тяжелые частицы движутся в ударном слое почти не изменяя своих первоначальных свойств (рис. 7 (а), 8 (а)), поля параметров относительно легких частиц практически совпадают с распределением параметров несущей фазы (рис. 7 (в), 8 (в)), а в промежуточной ситуации, соответствующей случаю умеренно инерционных частиц, в потоке возникают области многократного пересечения траекторий частиц, а также узкие кумулятивные «струи» частиц, попадающие на поверхность тела (рис. 7 (б), 8 (б)).

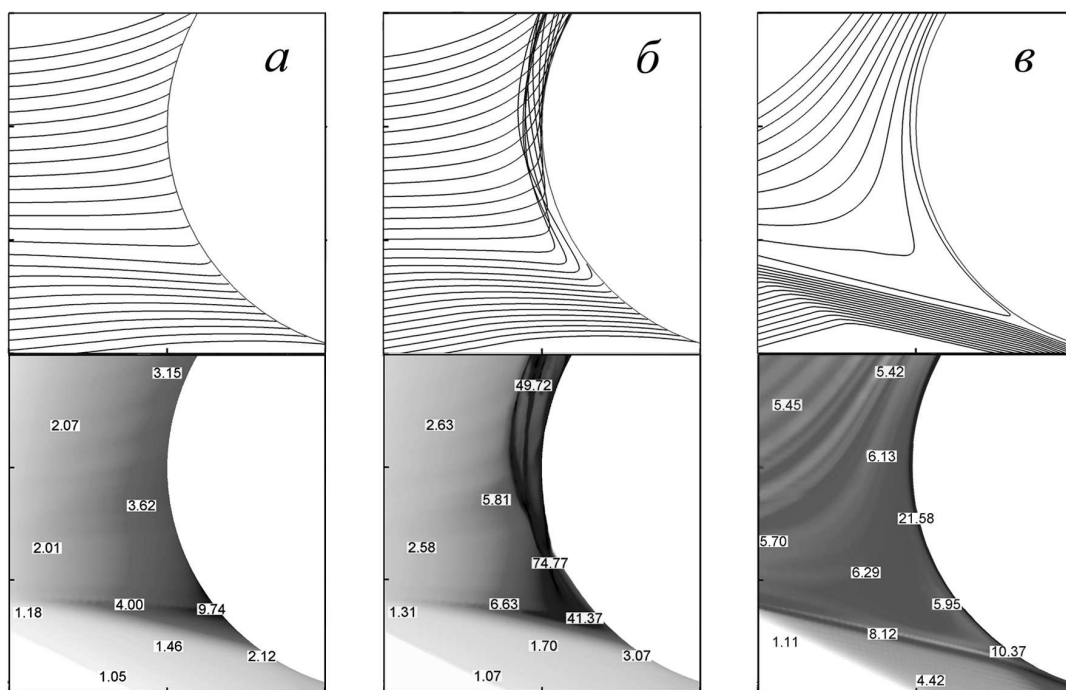


Рис. 7: Типичные поля траекторий и числовой концентрации частиц при III режиме взаимодействия волн. Рисунки *а-в* соответствуют сильно-, умеренно- и малоинерционным частицам.

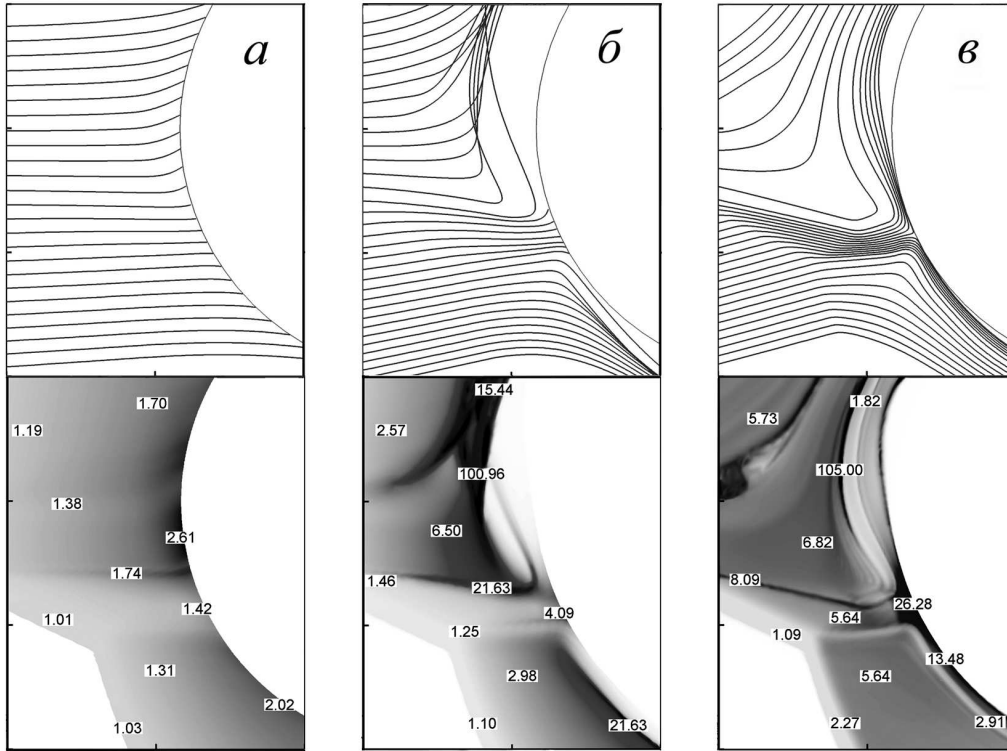


Рис. 8: Типичные поля траекторий и концентрации частиц при IV режиме взаимодействия волн. Рисунки *а-в* соответствуют сильно-, умеренно- и малоинерционным частицам.

В разделе 5.3 проводится анализ увеличения тепловых нагрузок на поверхность цилиндра за счет присутствия в набегающем потоке дисперсной примеси. Рассматривается течение в режиме инерционного осаждения частиц. В качестве оценки максимально возможных тепловых потоков со стороны дисперсной фазы использовано выражение для потока полной энергии частиц, спроектированного на нормаль к поверхности тела:

$$Q_s^* = mn_s^* V_{sn}^* \left(\frac{V_s^{*2}}{2} + c_s (T_s^* - T_w^*) \right) \quad (4)$$

Здесь звездочками отмечены размерные параметры газа и частиц.

Распределение безразмерного потока энергии $Q_s = Q_s^*/Q_0$ (где Q_0 – значение теплового потока чистого газа в критической точке в отсутствие косо го скачка уплотнения) вдоль поверхности цилиндра было рассчитано для рассматриваемых режимов взаимодействия волн, а также в случае симметричного течения. В последнем случае распределение Q_s при массовой концентрации $\alpha = 1\%$ для достаточно инерционных частиц подобно и совпадает по порядку с распределением тепловых потоков несущей фазы. Установлено, что значение безразмерного потока энергии частиц в критической точке Q_{s0} меняется в зависимости от размеров частиц немонотонно – в слу-

чае мелкодисперсной примеси $Q_{s0} = 0$ (частицы не выпадают на поверхность), для очень крупных частиц $Q_{s0} = \alpha\rho_0V_0^3/2Q_0$ (V_0 и ρ_0 – скорость и плотность газа в невозмущенном потоке), а при умеренных значениях инерционности частиц существует локальный максимум.

При наличии косо́го скачка уплотнения, взаимодействующего с головной волной, локальные значения тепловых потоков дисперсной фазы могут резко возрасти за счет попадания струй с высокой концентрацией частиц на поверхность тела. На рис. 9 показано изменение Q_s в зависимости от радиального угла φ , отсчитываемого от критической точки цилиндра, для III и IV режимов течения. В первом случае бралась массовая концентрация частиц $\alpha = 1\%$, во втором – 3% . Максимумы тепловых потоков со стороны газа и частиц приходятся приблизительно на один и тот же участок поверхности тела, при этом даже для массовой концентрации частиц в набегающем потоке порядка одного процента вклады обеих фаз в теплообмен сравнимы. Установлено, что в случае III типа взаимодействия за счет более ярко выраженной фокусировки частиц рост пиковых тепловых нагрузок в локальных зонах поверхности может быть более интенсивным, чем при IV режиме течения.

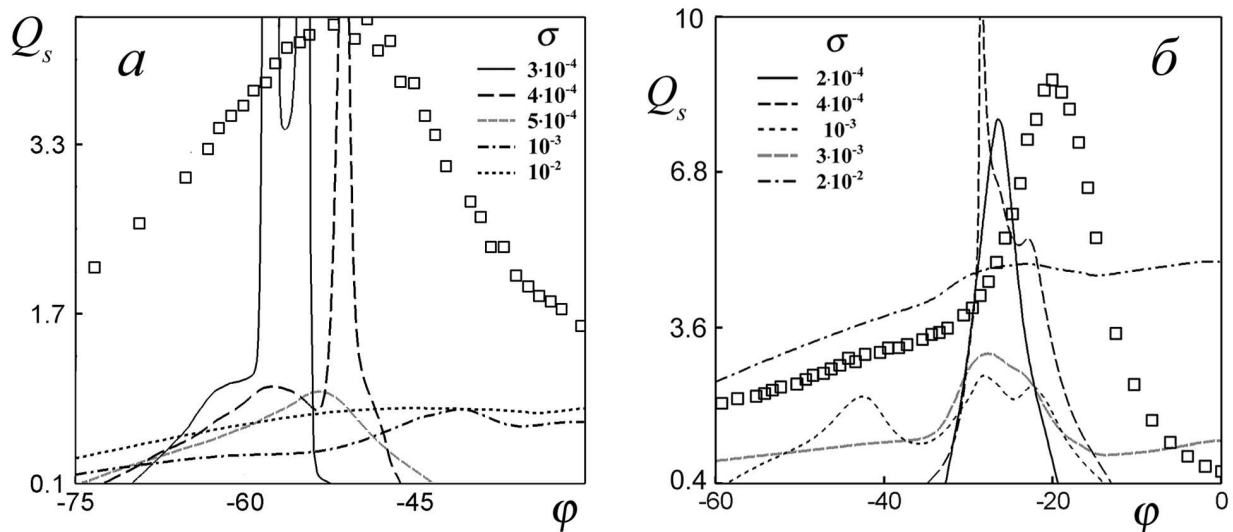


Рис. 9: Распределение полного потока энергии частиц вдоль поверхности цилиндра при $M_0 = 6$ для III (а) и IV (б) режимов течения (σ – радиус частиц, отнесенный к радиусу цилиндра). Маркерами изображено распределение теплового потока в чистом газе, отнесенного к Q_0 , из экспериментальной работы *Borovoy V.Ya., Chinilov A.Yu. et al., AIAA J., 1997, V. 35, N 11, P. 1721-1728.*

В **Заклучении** к диссертации подведены итоги работы и сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено параметрическое исследование структуры двухфазных течений в области взаимодействия плоских ударных волн в стационарных потоках запыленного газа. Показано, что при достаточно высокой массовой концентрации частиц и небольших числах Маха набегающего потока возможно возникновение непрерывных форм волн сжатия – волн с полной дисперсией. Установлено, что при регулярном взаимодействии двух плоских ударных волн возможны конфигурации, при которых любые из проходящих или исходящих скачков (в том числе и все скачки одновременно) вырождаются в волны с полной дисперсией. В случаях как симметричного, так и несимметричного взаимодействия определены диапазоны определяющих параметров (числа Маха, углов между проходящими волнами и набегающим потоком, отношения теплоемкостей фаз и массовой концентрации частиц), соответствующие всем возможным волновым конфигурациям.
2. Численно рассчитана структура неравновесного течения «внутри» волны с полной дисперсией, а также в области симметричного взаимодействия скачков для типичных волновых конфигураций, включающих волны с полной дисперсией. Показано, что ширина волн с полной дисперсией заметно превосходит характерную длину скоростной релаксации частиц. Расчеты структуры прямой волны с полной дисперсией показали, что с увеличением массовой концентрации частиц ширина области неравновесного течения резко сокращается, и существует диапазон параметров, в котором температура несущей фазы внутри волны имеет локальный максимум.
3. На основании численных расчетов взаимодействия ударных волн в слабозапыленном потоке установлено, что инерционные частицы могут фокусироваться за точкой взаимодействия, образуя «струи» с высокими локальными значениями концентрации и кинетической энергии дисперсной фазы. Аэродинамическая фокусировка частиц, возникающая в течениях подобного типа, исследована в предположении, что частицы не влияют на движение несущей фазы. Рассмотрено три различных режима взаимодействия плоских ударных волн: симметричное регулярное, симметричное маховское и несимметричное регулярное. Показано, что в широком диапазоне определяющих параметров траектории частиц за точкой взаимодействия волн пересекаются и формируется узкая зона накопления частиц, концентрация в которой возрастает в несколько раз по сравнению с начальным значением. На основании параметрических расчетов установлено, что наиболее эффективная фо-

кусировка частиц реализуется при маховском режиме, а также при регулярном взаимодействии волн небольшой интенсивности и малых отклонениях закона сопротивления частиц от стоксовского. Для случая симметричного регулярного взаимодействия определены условия, отвечающие оптимальным режимам фокусировки частиц, при которых конечный объем дисперсной фазы «схлопывается» в поверхность.

4. Обнаружена возможность аэродинамической фокусировки частиц и формирования локальных областей накопления дисперсной фазы и в случае более сложных конфигураций взаимодействующих ударных волн. Исследовано взаимодействие косоугольного скачка уплотнения с головной ударной волной при обтекании плоского цилиндра стационарным гиперзвуковым слабозапыленным потоком. Рассмотрены частные случаи III и IV типов взаимодействия ударных волн. Распределение параметров газа в ударном слое около цилиндра найдено из численного решения полных уравнений Навье-Стокса для совершенного газа. Траектории и поля континуальных параметров дисперсной фазы рассчитаны с использованием полного лагранжева подхода для различных инерционных свойств частиц. Установлено, что для умеренно инерционных частиц в поле течения дисперсной фазы могут возникать узкие зоны, в которых траектории частиц пересекаются, а концентрация частиц резко увеличивается. При III типе взаимодействия высока вероятность попадания таких «струй» частиц на поверхность тела, что приводит к резкому увеличению тепловых потоков в локальных точках поверхности. При этом максимумы тепловых потоков со стороны несущей и дисперсной фаз приходится приблизительно на одну и ту же область боковой поверхности цилиндра. Показано, что и в отсутствие выраженных кумулятивных «струй» вклад дисперсных частиц в тепловые потоки к телу сравним с вкладом несущей фазы даже при массовой концентрации частиц в набегающем потоке порядка одного процента.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Голубкина И.В. Взаимодействие ударных волн в запыленном газе // Труды конференции - конкурса молодых ученых 12-17 октября 2005. Изд. МГУ., 2006. С. 143-150.
2. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Аэродинамическая фокусировка инерционных частиц за точкой взаимодействия ударных волн // Тезисы конференции «Ломоносовские чтения». Секция механики. Апрель 2007 г. М. МГУ. С. 58-59.

3. Голубкина И.В. Аэродинамическая фокусировка инерционных частиц в зонах взаимодействия ударных волн // Труды конференции - конкурса молодых ученых 11-16 октября 2006 г. Изд. МГУ, 2007. С. 39-46.
4. Голубкина И.В. Фокусировка инерционных частиц за точкой пересечения скачков уплотнения // Труды института механики УНЦ РАН. 2007. Т. 5. С. 145-150.
5. Голубкина И.В. Исследование эффекта фокусировки частиц при взаимодействии ударных волн в запыленном газе // Тезисы XV школы - семинара «Современные проблемы аэрогидродинамики», Сентябрь 2007 г. Изд. МГУ. 2007. С. 36-37.
6. **Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Аэродинамическая фокусировка инерционных частиц в области пересечения ударных волн // Изв. РАН. МЖГ. 2007. №4. С. 107-116.**
7. Голубкина И.В. Исследование эффекта фокусировки частиц в области пересечения скачков уплотнения // Тезисы Всероссийской конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной 100-летию со дня рождения Л.И. Седова. 12-14 ноября 2007 г. С. 45-47.
8. A.N. Osiptsov, I.V. Golubkina, N.A. Lebedeva, Investigation of particle accumulation zones in disperse flows. CD of Proc. The 19th Intern. Sym. on Transport Phenomena. 2008. Iceland, Reykjavik. P. 1-7.
9. Голубкина И.В. Эффект фокусировки частиц за точкой пересечения скачков уплотнения // Труды научно-технической конференции «Будущее авиационной науки», ЦАГИ, 27 ноября 2008 г. С. 88-92.
10. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Исследование волн с полной дисперсией в запыленном газе // Тезисы конференции «Ломоносовские чтения». Секция механики. Изд. МГУ. 2009. С. 52.
11. Голубкина И.В. Оптимальные режимы фокусировки инерционных частиц в области взаимодействия ударных волн // Сборник трудов XVII школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях», 25-29 мая 2009. М. С. 194-197.
12. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Взаимодействие ударных волн и волн с полной дисперсией в запыленном газе // Тезисы конференции IX международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 4-13 июня 2009 г. С. 56-57.

13. Голубкина И.В. **Оптимальные режимы фокусировки инерционных частиц в области взаимодействия ударных волн // Тепловые процессы в технике. 2009. N 11. С. 473-476.**
14. Голубкина И.В. Взаимодействие волн сжатия в запыленном газе // Сб. «Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского». Казань. 2009. Том 39. С. 173-174.
15. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. **Взаимодействие скачков уплотнения в запыленном газе и возникновение волн с полной дисперсией // Изв. РАН. МЖГ. 2010. N1. С. 70-83.**
16. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Сахаров В.И. Взаимодействие головной ударной волны с косым скачком уплотнения в гиперзвуковом потоке запыленного газа // Тезисы конференции «Ломоносовские чтения». Секция механики. Изд. МГУ. 2010. С. 38.
17. Голубкина И. В. Возникновение волн с полной дисперсией при взаимодействии ударных волн в запыленном газе // Труды конференции - конкурса молодых ученых 14-17 октября 2009 г. Изд. Моск. унив., 2010. С. 42-49.
18. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Сахаров В.И. Обтекание цилиндра гиперзвуковым потоком запыленного газа при наличии косого скачка уплотнения, взаимодействующего с головной ударной волной // Тезисы XVI школы - семинара «Современные проблемы аэрогидродинамики», Сентябрь 2010 г. Изд. МГУ. 2010. С. 35-36.
19. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Сахаров В.И. **Взаимодействие головной ударной волны с косым скачком уплотнения в гиперзвуковом потоке запыленного газа // Изв. РАН. МЖГ. 2011. N 1. (в печати)**