

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ПАНФИЛОВ Сергей Владимирович

**РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ ПРИМЕСИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗОВЗВЕСИ**

Специальность
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена на кафедре плазмогазодинамики и теплотехники Балтийского государственного технического университета "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ЦИРКУНОВ Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор МАТВЕЕВ Сергей Константинович.
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ШМИДТ Александр Александрович

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится " 5 " июня 2008 года в 14 часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский проспект, д. 28, математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9.

Автореферат разослан " 18 " апреля 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



С.А. Зегжда

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Изучение обтекания тел или преград потоком газа с примесью твердых частиц представляет большой интерес как в чисто научном плане, так и с точки зрения многочисленных технических приложений.

В двухфазных течениях газа с примесью твердых частиц около ограничивающих поверхностей частицы, как правило, сталкиваются с поверхностью и отскакивают от нее. В случае достаточно крупных частиц их отражение играет важную роль в формировании картины течения и полей параметров дисперсной фазы.

В подавляющем большинстве работ частицы считаются твердыми сферами одинакового радиуса, поверхности – гладкими, а для определения параметров отдельной частицы после ее отскока от поверхности используются те или иные модели регулярного отражения. Однако реальные частицы часто имеют несферическую форму, а обтекаемая поверхность является шероховатой. Последнее, кстати, является правилом для пластичных металлов (незакаленная сталь и т.п.) в высокоскоростных двухфазных потоках ввиду эрозии поверхности. Несферичность частиц и шероховатость поверхности приводят к тому, что отражение частиц носит случайный характер, что приводит к их последующему перемешиванию в потоке. Другой причиной перемешивания частиц является их полидисперсность, так как траектории частиц различных размеров могут существенно различаться.

Интерес к эффектам шероховатости поверхности и несферичности частиц заметно усилился в последнее время в связи с попытками более правильной интерпретации экспериментальных данных, а также в связи с развитием более реалистичных численных моделей двухфазных течений около ограничивающих поверхностей.

Диссертационное исследование посвящено изучению рассеяния сферических и несферических частиц при их отражении от гладкой и шероховатой поверхностей, а также влиянию этого рассеяния на картину течения и поля параметров моно- и полидисперсной примеси.

Цели работы

1. Разработка модели и алгоритма расчета отражения частицы от шероховатой поверхности с учетом эффектов "теневых зон" на рельефе шероховатости и вторичных столкновений частицы с поверхностью в пределах одной впадины на рельефе.

2. Параметрическое исследование рассеяния сферических частиц на шероховатой поверхности, направленное на изучение зависимости характеристик рассеяния от угла падения частиц и параметров шероховатости.

3. Исследование влияния формы частиц на характеристики их рассеяния при отражении от гладкой и шероховатой поверхности. Оценка влияния трехмерных эффектов на характеристики рассеяния частиц, используемые при моделировании течений в двумерной постановке.

4. Исследование влияния шероховатости обтекаемой поверхности и полидисперсности частиц на динамику примеси.

5. Исследование влияния шероховатости на силу, действующую на обтекаемое тело со стороны дисперсной фазы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модель отражения частицы от шероховатой поверхности, основанная на рассмотрении кинематики частицы вблизи рельефа шероховатости.

2. Результаты параметрического исследования рассеяния сферических частиц, отраженных от шероховатой поверхности.

3. Результаты параметрического исследования рассеяния несферических частиц при их отражении от гладкой и шероховатой поверхности.

4. Метод расчета концентрации примеси в рамках дискретно-траекторного подхода, в частности, при множественных пересечениях траекторий частиц.

5. Результаты параметрического исследования влияния шероховатости обтекаемой поверхности и полидисперсности частиц на течение примеси.

6. Результаты параметрического исследования влияния шероховатости на величину дополнительной силы сопротивления тела (клина), связанной с воздействием дисперсной фазы.

Научная новизна работы

1. Впервые для описания рассеяния частиц, отраженных от шероховатой поверхности, разработана модель, основанная на использовании собственно геометрии рельефа шероховатости, а не его статистических характеристик.

2. Впервые проведено параметрическое исследование рассеяния сферических частиц на шероховатой поверхности в широком диапазоне геометрических характеристик рельефа шероховатости и углов падения. Установлено, что вторичные столкновения частиц с рельефом шероховатости могут существенно влиять на характеристики их рассеяния.

3. Впервые систематически исследовано рассеяние несферических частиц в трехмерной постановке. Установлено, что форма частиц существенно влияет на характеристики их рассеяния при отражении от гладкой поверхности.

4. Впервые исследовано рассеяние несферических частиц на шероховатой поверхности. Установлено, что при достаточно грубой шероховатости характеристики рассеяния частиц практически не зависят от их формы. Показано, что модель локального взаимодействия частицы с поверхностью играет важную роль для корректного моделирования рассеяния отраженных частиц.

5. На основании результатов проведенного параметрического исследования впервые дан сравнительный анализ влияния шероховатости обтекаемой поверхности и полидисперсности частиц на картину течения и профили концентрации примеси.

6. Впервые изучено влияние параметров шероховатости поверхности на величину дополнительной силы сопротивления, действующей на тело со стороны дисперсной фазы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и выводов основана, прежде всего, на строгом использовании законов механики при построении математических моделей удара частиц о поверхность и движения двухфазной смеси, а также надежных экспериментальных данных в замыкающих соотношениях (для коэффициентов восстановления скорости частиц при отражении, для составляющих межфазной силы в модели взаимодействия фаз и т.п.) В вычислительных алгоритмах использовались хорошо апробированные методы. Программы расчетов тестировались путем сравнения результатов с известными аналитическими и численными решениями.

Практическая ценность работы

Результаты выполненного исследования позволили четко установить роль шероховатости поверхности и несферичности формы частиц в их рассеянии при отскоке от поверхности, а также прояснить, как влияют эти факторы и дополнительно полидисперсность примеси на перемешивание частиц в потоке.

Разработанные и реализованные алгоритмы, позволили существенно сократить время расчетов при численном моделировании *стационарных* течений слабоконцентрированной газозвеси на основе дискретно-траекторного подхода, особенно в случае *полидисперсной* примеси.

Модели, методы и алгоритмы, развитые в диссертации, могут быть использованы для исследовательских целей и для расчетов течений запыленного газа при создании различных технических устройств.

Апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались на 12 российских и международных форумах (работы [2–13]). В том числе на двух Международных конференциях по многофазным течениям (ICMF'98, ICMF'07) и на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (2006 г.).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в 14 научных публикациях, из которых 10 статей и тезисы 4-х докладов. 13 работ написаны совместно с другими авторами.

В совместных работах [1–10, 12–14] научному руководителю Ю.М. Циркунову принадлежит общая постановка задачи.

Соискателю принадлежат: модель отражения частицы от шероховатой поверхности, модели двумерного и пространственного отражения несферической частицы, результаты параметрического численного исследования рассеяния сферических и несферических частиц различной формы, метод расчета поля концентрации моно- и полидисперсной примеси и результаты численного моделирования течений бесстолкновительной примеси в каналах. Отбор вариантов для расчетов, анализ и объяснение численных результатов выполнены авторами совместно.

В работе [1] Ю.М. Циркунову принадлежит математическая формулировка модели удара, а М.Б. Клычников обратил внимание на перезакрутку частицы, к которой ведет классическая модель удара при использовании опытных значений для коэффициентов восстановления нормальной и касательной к стенке составляющих скорости центра масс частицы. В работе [4] А.Н. Волкову принадлежат результаты расчетов течения столкновительной примеси. В работах [5–7] Ю.М. Циркунову принадлежит идея способа построения профиля шероховатости. Детальная реализация этой идеи принадлежит соискателю. В работе [8] Н.В. Лисуном выполнены предварительные расчеты по рассеянию несферических частиц. В работе [12] А.А. Веревкину принадлежат результаты расчетов нестационарного течения газозвеси в ударной трубе.

Статья [14] опубликована в журнале, входящем в перечень ВАК на момент публикации.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 88 наименований. Работа изложена на 100 страницах машинописного текста и включает 40 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований и ее научное значение, сформулированы цели и задачи работы.

В **первой главе** дан обзор современного состояния исследований по теме диссертации. В **разделе 1.1** рассмотрены основные модели, используемые для описания течений газозвесей в различных диапазонах концентрации примеси и размеров частиц. В **разделе 1.2** описаны и проанализированы применяемые модели взаимодействия частиц примеси с обтекаемой поверхностью, а также методы моделирования шероховатости. **Раздел 1.3** посвящен

вопросам абразивной эрозии поверхностей в высокоскоростных потоках газа с частицами.

Вторая глава посвящена исследованию влияния шероховатости поверхности и формы частиц на их рассеяние при отражении. В **разделе 2.1** рассмотрены основные характеристики рассеяния частиц и введены трехмерные и двумерные (в плоскости падения) функции плотности вероятности отскока частиц в том или ином направлении, определяемом углами α_2 и β_2 (рис. 1). Графики этих функций соответственно в сферической и полярной системах координат рассматриваются далее как пространственная и двумерная индикатрисы рассеяния.

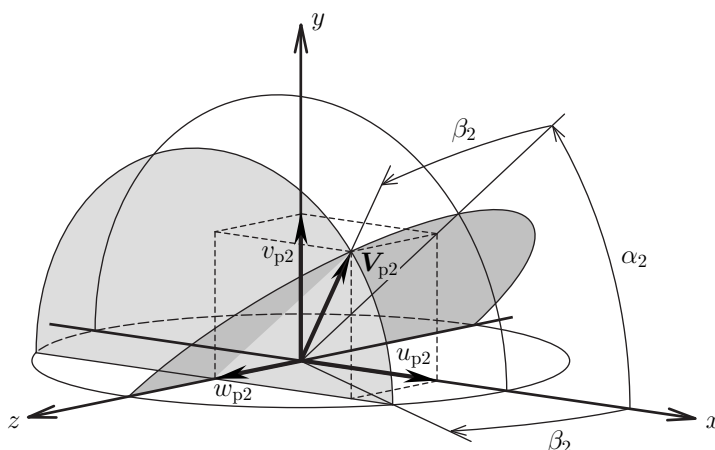


Рис. 1. Определение направления пространственного отражения частицы.

Индикатрисы рассеяния строятся численно по результатам расчетов отражения большого числа ($\sim 10^7$) пробных частиц, т.е. методом прямого статистического моделирования.

В **разделе 2.2** отмечается, что в экспериментах по обтеканию клиньев из мягких металлов высокоскоростным (100–300 м/с) потоком газа с частицами электрокорунда рельеф шероховатости, возникающий в результате абразивной эрозии, имеет практически двумерный характер в виде поперечных потоку волн. Это позволяет моделировать рельеф шероховатости двумерным профилем. В разделе предложена модель отражения частицы от двумерной шероховатости, которая применима в случае, если размер частиц существенно меньше среднего расстояния между соседними выступами профиля шероховатости. Описан алгоритм расчета отскока частицы от шероховатой поверхности. Существенной чертой алгоритма является учет возможности нескольких соударений частицы с рельефом в пределах одной впадины до отлета частицы от поверхности (рис. 2). Каждое отдельное соударение рассчитывается с помощью модели удара частицы с плоскостью, касательной к профилю шероховатости в точке соударения. Параметры частицы после последнего соударения с рельефом принимаются за параметры отражения от поверхности.

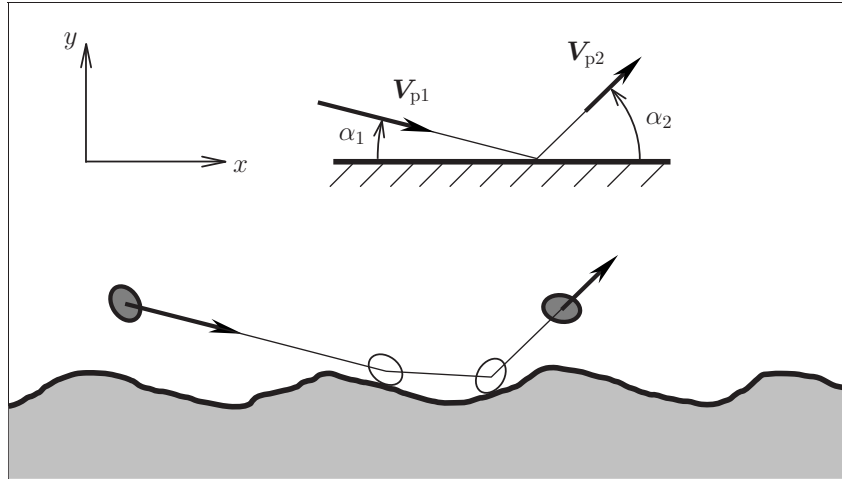


Рис. 2. Схема движения частицы при отражении.

Двумерный профиль шероховатости моделируется кубическим сплайном, проходящим через последовательность точек, координаты которых определяются соотношениями $x_i = x_{i-1} + \xi$, $y_{wi} = \eta$, где ξ , η – нормально распределенные случайные величины с математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями соответственно $M_\xi = h/2$, $\sigma_\xi \leq h/6$, $M_\eta = 0$, $\sigma_\eta \leq y_{w \max}/3$. Величины h и $y_{w \max}$ соответствуют среднему шагу и максимальной высоте выступов шероховатости. Параметры M_ξ , σ_ξ и σ_η , выбранные из условия наилучшего согласия двумерных индикатрис рассеяния сферических частиц, полученных для численно построенного и измеренного профилометром реальных профилей шероховатости, имели значения соответственно 80 мкм, 10 мкм и 20 мкм.

Раздел 2.3 посвящен параметрическому исследованию рассеяния *сферических* частиц на шероховатой поверхности в широком диапазоне углов падения и параметра профиля шероховатости σ_η . Для расчета локальных соударений используется полуэмпирическая модель удара [1]. Исходные данные приняты близкими к условиям экспериментов: $V_{p1} = 200$ м/с, $r_p = 16$ мкм, материал частиц – корунд, а материал стенки – мягкая сталь. Использовался модельный профиль шероховатости с фиксированными параметрами $M_\xi = 80$ мкм и $\sigma_\xi = 10$ мкм, что соответствует среднему расстоянию между выступами $h = 160 \pm 60$ мкм.

Заметное рассеяние частиц наблюдается уже при $\sigma_\eta = 0,5$ мкм, что соответствует максимальной высоте выступов всего $y_{w \max} = 1,5$ мкм. При $\sigma_\eta = 3$ мкм ($y_{w \max} = 9$ мкм) доминирующее направление отражения частиц начинает заметно отличаться от направления регулярного (от гладкой поверхности) отражения. Для реальной шероховатости ($\sigma_\eta = 20$ мкм) до-

минирующее направление отражения частиц существенно отличается от направления регулярного отражения.

С увеличением угла падения частиц α_1 (рис. 2) растет роль повторных отражений, и характеристики рассеяния существенно изменяются. Надо отметить, что во всех моделях шероховатости, использующих статистические характеристики профиля, учет повторных отражений невозможен. Это может приводить к значительным погрешностям при моделировании рассеяния частиц.

Результаты расчетов показали, что при $r_p < h$ влияние размера частиц на их рассеяние несущественно.

В **разделе 2.4** исследовано рассеяние частиц различной несферической формы при отражении от гладкой и шероховатой поверхностей. Рассматривались эллипсоиды вращения, прямоугольные параллелепипеды и прямоугольный параллелепипед с отсеченными вершинами. Пространственная ориентация частицы и ее положение относительно профиля шероховатости перед первым соударением задавались случайным образом. Кроме частиц фиксированной формы были рассмотрены смеси, в которых параметры формы частиц (отношения осей для эллипсоидов и отношения сторон для параллелепипедов) являлись случайными величинами, равномерно распределенными на интервале $[0,5, 1,5]$, либо распределенными по нормальному закону с математическим ожиданием 1 (сфера или куб) и среднеквадратическим отклонением 0,1. Кроме того рассмотрена смесь из частиц различной формы.

Для оценки влияния формы частиц на их рассеяние при отражении от плоской поверхности использовалась следующая модель отскока. Контакт частицы с поверхностью считался точечным. Для точки контакта частицы с поверхностью коэффициент восстановления касательной компоненты скорости $a_{\tau c}$ равен нулю (условие отсутствия скольжения в точке контакта в момент отскока), а коэффициент восстановления нормальной компоненты скорости имел постоянное значение $a_{nc} = 0,8$.

В работе построены трехмерные индикатрисы рассеяния для всех указанных выше вариантов частиц. Дан их сравнительный анализ для случаев гладкой и шероховатой поверхностей. Для построения каждой индикатрисы рассчитывался отскок примерно 10^7 частиц. По результатам расчетов построены также двумерные (в плоскости падения) индикатрисы. Для гладкой поверхности они приведены на рис. 3,а. Видно, что форма частиц имеет первостепенное значение при их рассеянии на гладкой поверхности. По сравнению с эллипсоидами, параллелепипеды рассеиваются гораздо шире по углу α_2 , а доминирующее направление их отскока заметно отличается от направления отражения сферических частиц (угол α_2^0). Смеси эллипсоидальных частиц со случайным отношением осей имеют небольшое рассеяние с доминирующим направлением, совпадающим с направлением отражения сферических

частиц. По характеристикам рассеяния параллелепипеды с отсеченными вершинами оказались между эллипсоидами и параллелепипедами. Двумерные индикатрисы рассеяния в случае шероховатой поверхности показаны на рис. 3,б. Как видно, индикатрисы рассеяния для всех рассмотренных несферических частиц фиксированной формы очень близки, а также они близки к индикатрисе для сферических частиц. Аналогичная ситуация имеет место и для смесей частиц различной формы (рис. 4,б). Значение наиболее вероятного угла отражения α_2 на рисунке 3,б значительно превосходит значение для частиц, рассеянных на гладкой поверхности (рис. 3,а). Влияние шероховатости особенно велико для эллипсоидальных частиц (ср. кривые 2 и 3 на рис. 3,а и б).

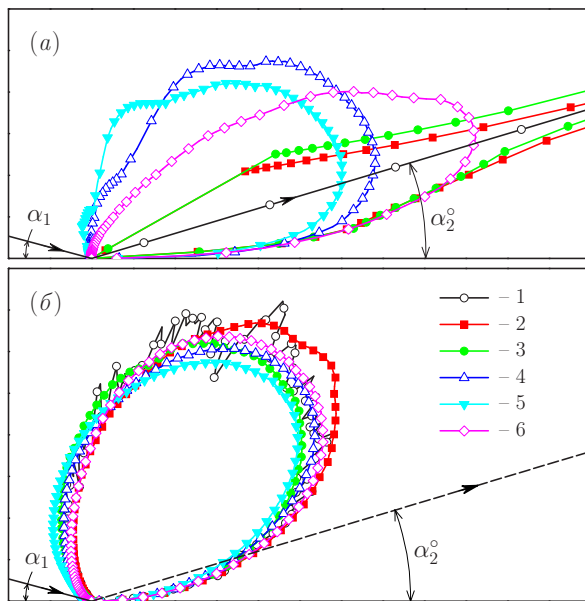


Рис. 3. Двумерные индикатрисы рассеяния $f(\alpha_2)$ для различных частиц фиксированной формы, отраженных от гладкой (а) и шероховатой (б) поверхности: 1 – сфера; 2 – вытянутый эллипсоид ($b/a = 0,8$); 3 – сплюснутый эллипсоид ($b/a = 1,25$); 4 – вытянутый параллелепипед ($b/a = c/a = 0,8$); 5 – сплюснутый параллелепипед ($b/a = c/a = 1,25$); 6 – параллелепипед с отсеченными вершинами; $\alpha_1 = 15^\circ$.

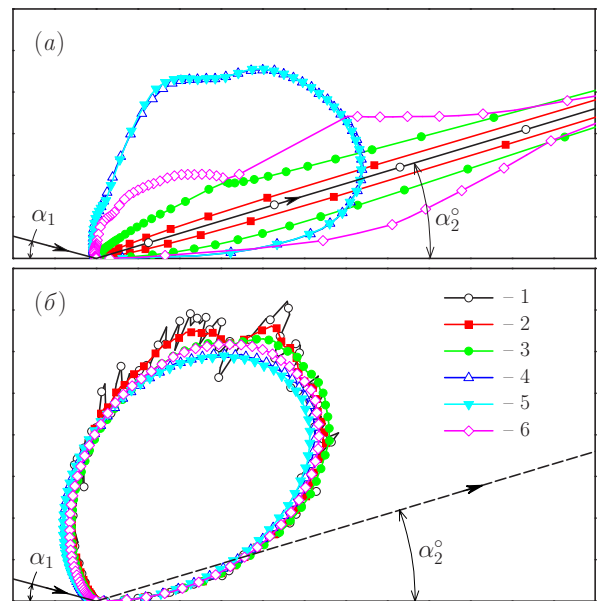


Рис. 4. Двумерные индикатрисы рассеяния $f(\alpha_2)$ для смесей частиц, отраженных от гладкой (а) и шероховатой (б) поверхности: 1 – сфера; 2 – эллипсоиды с $b/a \sim N(1, 0,1)$; 3 – эллипсоиды с $b/a \sim U[0,5, 1,5]$; 4 – параллелепипеды с $b/a \sim N(1, 0,1)$; 5 – параллелепипеды с $b/a \sim U[0,5, 1,5]$; 6 – смесь эллипсоидов ($b/a=0,8$ и $1,25$), параллелепипедов ($b/a=0,8$ и $1,25$) и параллелепипедов с отсеченными вершинами; $\alpha_1 = 15^\circ$.

В **третьей главе** исследовано влияние рассеяния отраженных частиц на течение дисперсной фазы на двух примерах высокоскоростного течения запыленного газа: стационарного течения в горизонтальном канале с шероховатой клиновидной ступенькой на нижней стенке канала и нестационарного течения в следе при обтекании в канале шероховатого клина конечного размера. В

виду того, что в случае шероховатой поверхности индикатрисы рассеяния частиц всех рассмотренных форм очень близки, рассматривались сферические частицы. Исследовано влияние рассеяния при отражении и полидисперсности частиц на их перемешивание в потоке. Скорость невозмущенного потока, а также размер и материал частиц примеси были взяты близкими к условиям экспериментов. При расчете локальных соударений частиц с рельефом шероховатости использовалась полуэмпирическая модель удара [1]. Концентрация частиц предполагалась настолько малой, что можно было пренебречь столкновениями между частицами и обратным влиянием примеси на течение несущего газа.

Для полидисперсной примеси принят логарифмически-нормальный закон распределения частиц по размерам (**раздел 3.1**). Для массовой функции распределения частиц задавался их наиболее вероятный размер r_{pg} и параметр s ($\ln s$ – среднеквадратическое отклонение величины $\ln r_p$).

В **разделе 3.2** предложен и описан метод расчета полей концентрации примеси в рамках дискретно-траекторного подхода. Он основан на подсчете времени пребывания частиц в ячейках расчетной сетки с последующим протранственно-временным осреднением. Метод хорошо работает при множественных пересечениях траекторий частиц, что типично в рассмотренных задачах, и особенно эффективен при моделировании течений бесстолкновительной полидисперсной примеси.

Используемая модель межфазного взаимодействия (**раздел 3.3**) включает в себя те составляющие, которые играют ключевую роль в исследованных примерах течений: силу аэродинамического сопротивления, силу Магнуса и аэродинамический момент.

В **разделе 3.4** описаны использованные в работе методы расчета течения несущего газа на основе уравнений Эйлера. Это конечно-объемные методы второго порядка аппроксимации по пространству и времени для неструктурированных сеток с вычислением потоков консервативных переменных через грани ячеек по схеме Годунова или схеме Ошера–Соломона. Программы расчета предварительно тестировались на решении модельных задач.

Разделы 3.5 и 3.6 посвящены описанию и анализу результатов параметрического исследования двумерных течений запыленного газа в каналах: стационарного течения в канале с клиновидной ступенькой на нижней стенке (имеющей шероховатую наклонную поверхность) и течения в нестационарном следе за шероховатым клином конечного размера. На рисунках 5–6 показаны мгновенные картины течения отраженных частиц в канале со ступенькой при различных значениях параметра шероховатости σ_η . В случае *монодисперсных* частиц их заметное рассеяние в потоке наблюдается уже при очень малой шероховатости (при $\sigma_\eta = 0,5$ мкм, что соответствует максимальной

высоте выступов на профиле шероховатости 1,5 мкм при минимальном расстоянии между соседними выступами более 100 мкм). Рассеяние частиц в потоке возрастает с увеличением высоты выступов шероховатости и имеет "диффузный" характер до значений $\sigma_\eta \sim 10$ мкм. При достаточно высоких выступах (см. картину течения при $\sigma_\eta = 20$ мкм), заметная часть частиц фокусируется в тонком слое, где концентрация частиц имеет тот же порядок, что и в слое частиц, отраженных от гладкой поверхности (ср. кривые, соответствующие гладкой поверхности и $\sigma_\eta = 20$ мкм, на рисунке 7,а).

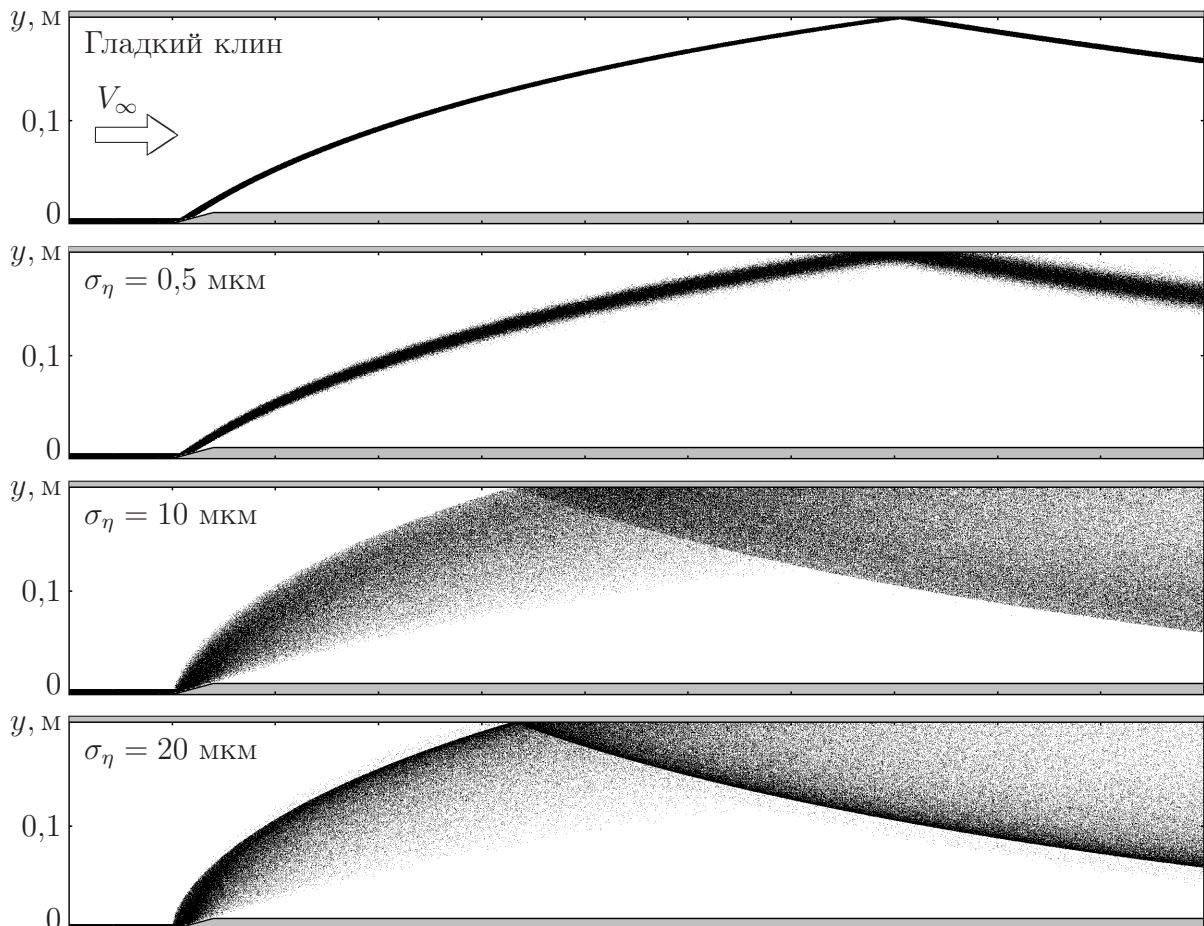


Рис. 5. Мгновенные картины течения монодисперсных частиц в канале. $r_p = 16$ мкм.

Перемешивание полидисперсных частиц в потоке возрастает с увеличением дисперсии их размеров. При достаточно большой дисперсии частиц (рис. 6) *влияние полидисперсности преобладает над влиянием шероховатости*. Это полностью подтверждается профилями концентрации примеси в выходном сечении канала, показанными на рис. 7. Видно, что различия между кривыми 1–6 очень малы при $s = 1,2$, а при $s = 1,728$ все кривые совпадают. Это значит, что в последнем случае влияние рассеяния частиц при отражении от шероховатой поверхности на их перемешивание в потоке пренебрежимо мало по сравнению с влиянием полидисперсности.

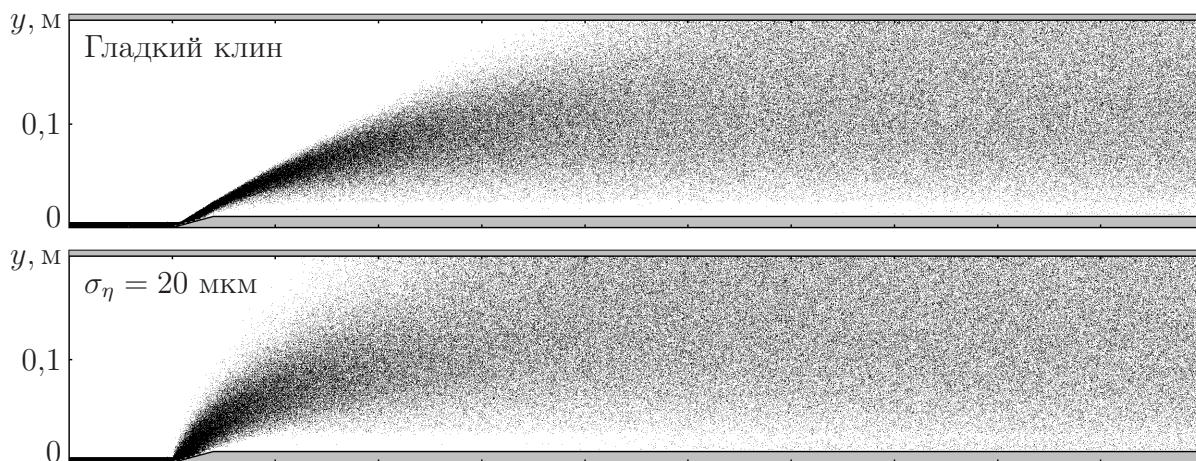


Рис. 6. Мгновенные картины течения полидисперсных частиц. $r_{pg} = 16$ мкм, $s = 1,728$.

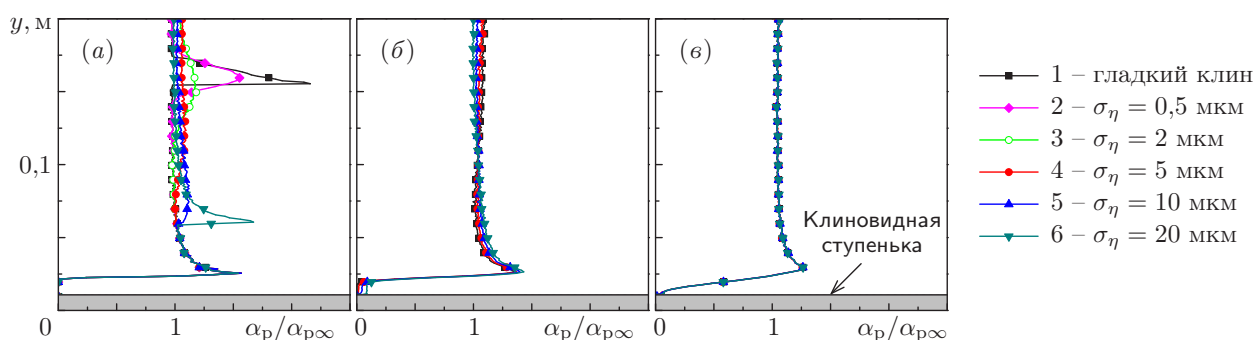


Рис. 7. Профили относительной объемной концентрации частиц в выходном сечении канала: монодисперсные частицы ($r_p = 16$ мкм) (а) и полидисперсные частицы ($r_{pg} = 16$ мкм) при $s = 1,2$ (б) и $s = 1,728$ (в). $\alpha_{p\infty}$ – концентрация частиц на входе в канал.

Результаты расчетов обтекания в канале клина конечного размера с точки зрения влияния шероховатости его поверхности и полидисперсности частиц качественно согласуются с результатами, полученными для клиновидной ступеньки. Сравнение силы сопротивления, действующей со стороны дисперсной фазы на гладкий и шероховатый клин ($F_D^+(0)$ и $F_D^+(\sigma_\eta)$, соответственно), показало что отношение $F_D^+(\sigma_\eta)/F_D^+(0)$ увеличивается с ростом шероховатости поверхности клина (с увеличением σ_η) и практически не зависит от степени полидисперсности примеси. Для абразивной шероховатости клина это отношение примерно равно 1,4.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Разработана модель отражения частицы от шероховатой поверхности, основанная на рассмотрении кинематики частицы вблизи рельефа шероховатости. Показано, что для корректного моделирования рассеяния частиц необходимо учитывать эффект вторичных отражений частицы хотя бы в пределах

одной впадины на профиле поверхности. Это невозможно сделать в рамках известных моделей, основанных на использовании статистических характеристик профиля шероховатости.

2) На основе полуэмпирической модели удара, являющейся на сегодняшний день наиболее реалистичной для умеренных и больших скоростей удара (50...500 м/с), проведено параметрическое исследование рассеяния сферических частиц при их отражении от шероховатой поверхности. Установлено, что заметное рассеяние отраженных частиц наблюдается даже в случае очень малой шероховатости, когда высота выступов на профиле шероховатости существенно меньше (в $\sim 10^2$ раз) среднего расстояния между ними. С увеличением средней высоты выступов изменяется как характер рассеяния, так и наиболее вероятное направление отражения частиц, которое начинает существенно отличаться от направления их регулярного (от гладкой поверхности) отражения.

3) Впервые рассеяние несферических частиц при отражении от гладкой и шероховатой поверхности рассмотрено в трехмерной постановке. Результаты проведенного параметрического исследования показали, что форма частиц существенно влияет на их рассеяние при отражении от гладкой поверхности. В этом случае пространственный характер рассеяния частиц существенно влияет на распределение угла их отражения в плоскости падения, поэтому даже при моделировании двумерных течений столкновения частиц со стенкой необходимо рассматривать в трехмерной постановке. Показано, что в случае достаточно грубой шероховатости форма частиц практически не влияет на характеристики их рассеяния. В то же время модель локального взаимодействия частицы с поверхностью существенно влияет на результаты расчетов. Поэтому в задачах обтекания шероховатых поверхностей предпочтительнее считать частицы сферическими и использовать более реалистичные модели удара, что очень важно для корректного определения параметров отраженных частиц. В случае гладких поверхностей для корректного моделирования рассеяния несферических частиц необходимо дальнейшее изучение процесса их ударного взаимодействия с поверхностью и разработка соответствующих моделей удара.

4) Предложен метод расчета полей концентрации дисперсной фазы. Он основан на траекторных расчетах с последующим пространственно-временным осреднением параметров частиц по ячейкам расчетной сетки. Данный метод обобщен на полидисперсную примесь. Предложен численный алгоритм, позволяющий существенно уменьшить общее количество пробных частиц путем замены реальной функции распределения в невозмущенном течении на более равномерную.

5) Исследовано влияние шероховатости обтекаемой поверхности и полидисперсности примеси на картину течения и поле концентрации дисперсной

фазы на примере двух задач: стационарного течения в канале с клиновидной ступенькой и нестационарного течения в следе при обтекании клина конечного размера. Установлено, что шероховатость обтекаемой поверхности существенно влияет на динамику отраженных частиц в случае монодисперсной примеси. В случае полидисперсных частиц влияние шероховатости на картину течения примеси незначительно.

б) Исследование влияния шероховатости поверхности клина на его сопротивление в потоке газозвеси показало, что наличие шероховатости может приводить к увеличению на десятки процентов дополнительной силы сопротивления, обусловленной отражением частиц примеси от поверхности клина.

Список публикаций по теме диссертации:

- [1] Циркунов Ю.М., Панфилов С.В., Клычников М.Б. Полуэмпирическая модель ударного взаимодействия дисперсной частицы примеси с поверхностью, обтекаемой потоком газозвеси // ИФЖ, 1994, т. 67, № 5-6, С. 379–386.
- [2] Tsirkunov, Yu.M., Panfilov, S.V. Dusty Gas Flow Around Bodies: Effects of Non-Elastic Reflection of Particles // Proc. of the 2nd European Fluid Mechanics Conference, Warsaw, Poland, September 20–24, 1994. Abstracts of Papers.
- [3] Циркунов Ю.М., Панфилов С.В. Исследование течений "газ–твердые частицы" около тел с использованием новой модели столкновений частиц с поверхностью // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: Сб. материалов Междунар. школы-семинара. С.-Петербург, 20–24 июня 1995. СПб., 1995. С. 80–83.
- [4] Циркунов Ю.М., Волков А.Н., Панфилов С.В. Движение твердых частиц примеси и эрозия поверхности при обтекании тел потоком слабоконцентрированной газозвеси // Труды XIII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1996. С. 109–116.
- [5] Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. Численное моделирование отражения частиц примеси от шероховатых поверхностей в двухфазных течениях // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: Сб. материалов Второй междунар. школы-семинара. С.-Петербург, 30 июня – 5 июля 1997. СПб., 1997. С. 101–104.
- [6] Tsirkunov, Yu.M., Panfilov, S.V. Modelling of particle-wall interaction in two-phase flows at moderate and high particle impact velocity // Proc. of

the Third Int. Conf. on Multiphase Flow, ICMF'98, Lyon, France, June 8–12, 1998, CD-ROM "ICMF'98", paper 693, 8 p.

- [7] Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. Численное исследование течения полидисперсной примеси при сверхзвуковом обтекании шероховатого клина потоком газозвеси // Современные проблемы аэрокосмической науки. Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Жуковский, 26–28 мая 1999 г. ЦАГИ, 1999. С. 77–78.
- [8] Циркунов Ю.М., Панфилов С.В., Лисун Н.В. Рассеяние дисперсных частиц примеси при отражении от поверхности тела, обтекаемого двухфазным потоком // Вторые Поляховские чтения: Избранные труды – СПб.: Изд-во НИИ Химии С.-Петербургского университета, 2000. С. 208–226.
- [9] Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. Влияние абразивной эрозии поверхностей в высокоскоростных потоках запыленного газа на динамику примеси и сопротивление тел // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Жуковский, 21–24 сентября 2004 г. ЦАГИ, 2004. С. 347–350.
- [10] Tsirkunov, Yu.M., Panfilov, S.V. Particles scattering in particle-wall collisions and its effect on the particle-phase flow // Proc. of the EUROMECH Colloquium 447. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., Vol. 11, No. 2, 2005, pp. 126–139.
- [11] Панфилов С.В. Рассеяние частиц примеси при обтекании тел высокоскоростным потоком газозвеси // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. II (Нижний Новгород, 22–28 августа 2006). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006. С. 144.
- [12] Tsirkunov, Yu.M., Panfilov, S.V., Verevkin, A.A. Wind tunnels and shock tubes as the tools for experimental studies of dusty gas flows over bodies: theoretical and numerical prediction and analysis // Proc. of the 2nd European Conference for AeroSpace Sciences (EUCASS), Bruxelles, Belgique, July 2–6, 2007, 8 p.
- [13] Tsirkunov, Yu.M., Panfilov, S.V. Particle scattering in particle-wall collisions: the combined effect of the particle non-sphericity and the wall roughness // Proc. of the 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9–13, 2007, 10 p.
- [14] Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. Рассеяние несферических частиц примеси при отскоке от гладкой и шероховатой поверхности в высокоскоростном потоке газозвеси // ПМТФ, 2008, № 2, С. 79–88.