

УДК 532.529.5

**АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА ЧАСТИЦ
В ПОТОКАХ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**

© 2011 г.

О.Д. Рыбдылова, И.В. Голубкина

НИИ механики Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова

orybdylova@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Эффект аэродинамической фокусировки частиц в газодисперсных потоках применяется прежде всего для создания узких направленных пучков частиц. Такие коллимированные пучки частиц активно используются в различных технических приложениях, например в технологиях резки материалов, обработки поверхностей деталей и конструкций, нанесения покрытий и др. Предложены две новые схемы течения, в которых возможно проявление эффекта аэродинамической фокусировки частиц. Первая схема представляет собой течение запыленного газа в области двух плоских взаимодействующих между собой ударных волн. Сжатие потока несущей фазы и инерционные свойства частиц обеспечивают эффект накопления частиц за точкой взаимодействия волн. Во второй схеме течения эффект фокусировки частиц достигается за счет воздействия на частицы боковой силы, возникающей в пограничном слое за ударной волной, движущейся в узком канале постоянного сечения.

Ключевые слова: фокусировка частиц, ударная волна, запыленный газ, полный лагранжев метод.

**Модель запыленного газа.
Полный лагранжев метод**

Движение облака аэрозольных частиц описывается в рамках модели запыленного газа. Несущая фаза – совершенный газ; дисперсные включения – одинаковые сферические частицы радиуса σ и массы m ; тензор напряжений в среде частиц отсутствует. В межфазном обмене импульсом учитываются сила аэродинамического сопротивления и подъемная сила (сила Сэфмана). Влиянием частиц на несущую фазу пренебрегается. Важной особенностью всех проведенных исследований является использование полного лагранжевого подхода для расчета параметров частиц. Суть этого подхода состоит в использовании лагранжевой формы законов сохранения массы, импульса и энергии 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, что делает возможным исследование течений с множественными пересечениями траекторий час-

тиц и локальными зонами накопления дисперсной фазы.

**Взаимодействие ударных волн
в запыленном газе**

Рассматриваются регулярный симметричный, регулярный несимметричный, маховский симметричный режимы взаимодействия волн. Параметры газа, постоянные в каждой области, ограниченной газодинамическими разрывами, определяются аналитически из условий непрерывности потоков массы, импульса и энергии на разрывах. В результате численного моделирования движения частиц установлено, что в случае взаимодействия достаточно сильных ударных волн за отраженными скачками возникают зоны неоднозначности, в которых траектории частиц пересекаются, а концентрация частиц возрастает на порядок по сравнению с начальным значением в области невозмущенного течения [1]. При этом наиболее интересны случаи перехода от течений с зонами неоднозначности к течениям, в которых пересечения траекторий частиц не происходит. Такие случаи соответствуют оптимальным режимам фокусировки частиц, когда конечный объем дисперсной фазы «схлопывается» в бесконечно узкую «нить». Проведенное параметрическое исследование показало, что оптимальные режимы фокуси-

ровки реализуются при взаимодействии ударных волн небольшой интенсивности и в случае достаточно мелких частиц дисперсной примеси.

На рис. 1 приведен пример такого режима: прямоугольное облако частиц движется в стационарной системе пересекающихся скачков уплотнения; показана деформация объема дисперсной фазы в последовательные моменты времени.

Течение запыленного газа за ударной волной в узком канале постоянного сечения

Рассматривается течение вязкого запыленного газа за ударной волной, движущейся с постоянной скоростью на небольшом участке плоского или цилиндрического канала. Диаметр (ширина) канала предполагается настолько малым, что пограничные слои, нарастающие на стенках канала за ударной волной, смыкаются в рассматриваемой области течения. В таком случае движение частиц определяется действием сил аэродинамического сопротивления и подъемной силы, возникающей из-за неоднородности потока на масштабе частицы. Параметры несущей фазы за ударной волной определяются из численного решения уравнений Навье–Стокса в приближении узкого канала. В зависимости от соотношения между силой аэродинамического сопротивления и подъемной силой возможны три различных режима движения частиц [2]: монотонное приближение к стенкам канала; движение по направлению к оси симметрии; многократное пересечение частицами оси канала с постепенно уменьшающейся амплитудой.

Обнаружен диапазон параметров, для которого имеет место эффект фокусировки частиц на оси симметрии канала. Для каналов диаметром порядка 10^{-3} м и относительно слабых ударных волн эффект фокусировки наиболее выражен для частиц с диаметром порядка 10^{-5} м. На рис. 2 представлены траектории частиц в системе координат, связанной с ударной волной; показаны примеры, соответствующие второму (а) и третьему (б) режимам течения.

Взаимодействие косого скачка уплотнения с головной ударной волной при обтекании цилиндра сверхзвуковым запыленным потоком

Исследование аэродинамической фокусировки частиц имеет важное значение, поскольку этот эффект может использоваться в разнообразных приложениях, но он также может служить источником опасных явлений. Например, если сфокусированные пучки частиц попадают на поверхность летательных аппаратов или детали энергетических установок, это может привести к эрозии поверхности или даже полному разрушению объекта. Рассматривается один из типов течения, при котором могут возникать подобные ситуации. Исследуется стационарное обтекание плоского затупленного тела сверхзвуковым запыленным потоком в условиях, когда на головную ударную волну падает косой скачок уплотнения. Такая конфигурация может возникать на краях воздухозаборников и других выступающих частей конструкций сверх-

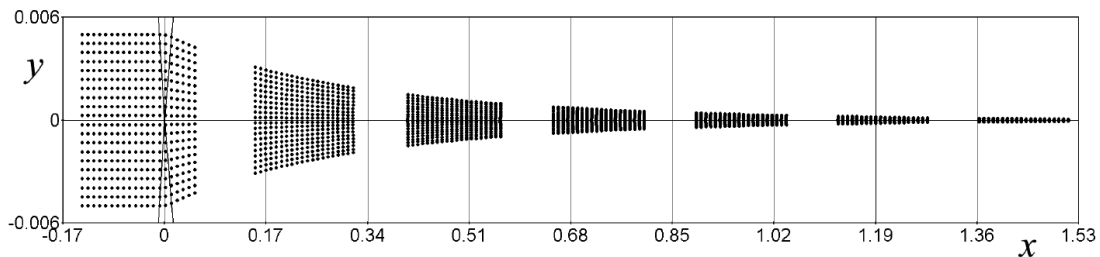


Рис. 1

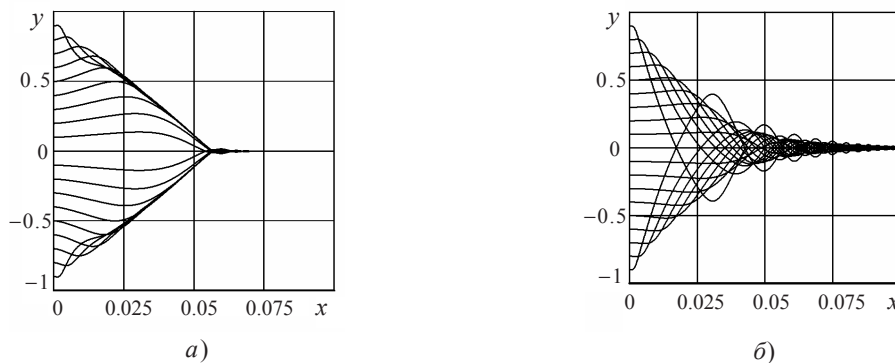


Рис. 2

звуковых летательных аппаратов. Даже в чистом газе при попадании косоугольного скачка на головную волну близко к оси симметрии тепловые потоки к поверхности тела достигают аномально высоких значений, поэтому в высокоскоростной аэродинамике расчет подобных конфигураций является базовой тестовой задачей при оценке максимальных тепловых нагрузок, которым могут подвергаться элементы летательного аппарата. В реальных приложениях атмосфера, в которой движется сверхзвуковой летательный аппарат, может содержать твердые включения, что только усугубляет проблему пиковых тепловых нагрузок на обтекаемую поверхность.

При исследовании указанной конфигурации распределение параметров газа в ударном слое находится из численного решения полных уравнений Навье–Стокса. Проведено параметрическое исследование траекторий, температуры и концентрации дисперсной фазы для различных значений радиуса частиц. Установлено, что для умеренно инерционных частиц за точкой взаимодействия косоугольного скачка с головной ударной волной

формируются узкие струи с высокой концентрацией частиц [3]. Попадание таких струй на поверхность тела вызывает резкое увеличение тепловых потоков в локальных точках поверхности, причем максимумы тепловых потоков со стороны несущей и дисперсной фаз приходится приблизительно на одну и ту же область поверхности затупленного тела. Однако и в отсутствие сфокусированных пучков частиц вклад дисперсной фазы в теплообмен в приповерхностной зоне значителен даже при небольшой массовой концентрации частиц в набегающем потоке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №11-01-00483) и гранта Президента РФ МК-3582.2011.1.

Список литературы

1. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. // Изв. РАН. МЖГ. 2007. №4. С. 107–116.
2. Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д. // ТОХТ. Т. 45, №1. С. 1–10.
3. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Сахаров В.И. // Изв. РАН. МЖГ. 2011. №1. С. 59–72.

AERODYNAMIC FOCUSING OF PARTICLES IN FLOWS WITH SHOCK WAVES

O.D. Rybdylova, I.V. Golubkina

The effect of aerodynamic particle focusing in gas-particle flows is employed mainly for creating collimated beams of particles. These beams are widely used in various engineering applications, such as cutting technologies of materials, surface processing, coating, etc. In this study, two novel flow schemes are investigated, in which the effect of aerodynamic particle focusing may arise. The first one is a steady-state dusty-gas flow in the region of the interaction of two plane shock waves. The compressibility of the carrier-phase flow and the particle inertia results in the particle accumulation effect behind the wave interaction point. In the second flow scheme, the focusing effect is achieved due to the lateral force, acting on the particles in boundary layers behind the shock wave travelling in a narrow channel with a constant cross-section.

Keywords: particle focusing, shock wave, dusty gas, full Lagrangian approach.