УДК 532.525.6

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ТЕЛА, ОБТЕКАЕМОГО ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СТРУЕЙ

Моллесон Г.В[1]., Стасенко А.Л.[1,2]

[1]*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт (гос. университет), Москва, Россия*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00820 и 11-08-00603, а также в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на 2011–2013 г.г.», тема № 10.11)

АННОТАЦИЯ

Разработаны математические модели и соответствующие численные коды для предсказания газотермодинамических, электрофизических и оптических характеристик потоков, взаимодействующих с быстродвижущимися телами. Для параметров, характерных для аэродинамических экспериментов, приведены примеры численного исследования пространственного распределения плотностей падающих, отраженных и хаотизированных фракций частиц в сжатом слое у тела, электрического потенциала, коэффициентов рассеяния зондирующего излучения, а также плотности потоков тока на поверхности тела.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие газодисперсных потоков с телами реализуется во многих областях науки и человеческой практики: при входе быстролетящих тел в льдистые облака или в запыленные атмосферы планет, при пескоструйной обработке поверхностей, при газодинамической расцепке модулей КЛА, в экспериментальных исследованиях в аэродинамических установках [1–4].

Газотермодинамика полидисперсных течений, взаимодействующих с твердыми телами, характеризуется рядом особенностей, связанных с большим разнообразием взаимодействия отдельной частицы с поверхностью. В частности, в широкой области параметров происходят отскок частиц, приобретающих значительную угловую скорость, их столкновения с налетающими частицами, образование хаотизированного двухфазного слоя в окрестности обтекаемого тела. Взаимодействие тела с полидисперсной струей добавляет специфические особенности, связанные с конечным размером устройств. Это приводит к тому, что скоростное и термодинамическое равновесие фаз не успевает наступить перед столкновением облака частиц с обтекаемым телом. Последнее обстоятельство вызывает сильную зависимость результатов от массового спектра частиц и необходимости исследовать течение начиная от камеры смешения.

К настоящему времени созданы теоретико-расчетные алгоритмы определения ряда особенностей, например, связанных с возникновением огибающей поверхности траекторий отраженных от тела частиц (лагранжев подход, траекторный дискретно-континуальный метод) и построены сложные синтетические модели обтекания [5, 6], суммирующие уравнения Больцмана, Навье–Стокса, k-ε и полуэмпирическую информацию о столкновениях частиц с твердым телом и друг с другом.

Для предсказания физических свойств таких течений в настоящей работе разработан комплекс математических моделей и соответствующих численных кодов, включающих следующие аспекты исследований.

© Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.

ТЕРМОМЕХАНИКА ОТДЕЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Синтезирована модель механики и теплообмена отдельной шаровой частицы, суммирующая всю накопленную к настоящему времени теоретическую и полуэмпирическую информацию. Эта модель учитывает зависимость коэффициентов сопротивления и теплообмена от чисел Рейнольдса и Маха при произвольных значениях числа Кнудсена, объемную неизотермичность частицы (отличие ее среднеобъемной и поверхностной температур); возможность сильного отличия температур несущего газа и частицы (например, за скачком уплотнения); обрезание спектра собственного теплового излучения частицы для длин волн, сравнимых с ее размерами; зависимость оптических коэффициентов рассеяния и поглощения от диэлектрической постоянной или удельной электропроводности материала частицы, а также недавние полуэмпирические данные о взаимном влиянии поступательного и вращательного движения частицы. Принципиально важной для описания поведения отраженной частицы является информация о коэффициентах восстановления компонент скорости частицы после ее столкновения с твердым телом [7]. В настоящей работе использованы зависимости этих коэффициентов (предложенные в [8] и опробованные в [9, 10]) от плотностей, модулей упругости и пределов текучести веществ сталкивающихся тел.

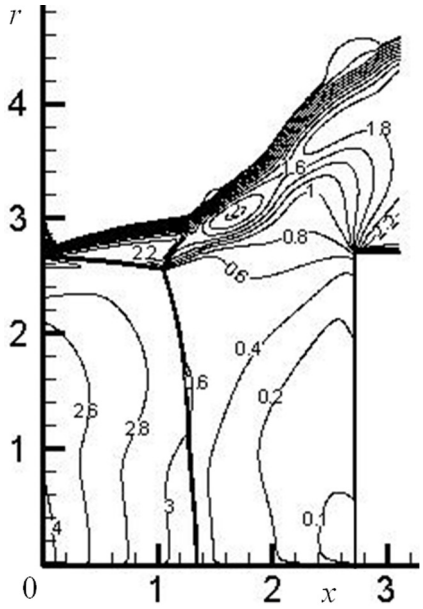

Рис.1 Поля изолиний чисел Маха в присутствии падающих, отраженных и хаотизированных частиц SiO_2 радиуса 6 мкм в поле течения у обтекаемого тела с их начальной массовой долей 50%.

Представляется своевременным создать алгоритмы исследования не только механики, но и всего набора физических процессов, реализующихся при обтекании тела двухфазным потоком, чему и посвящена настоящая работа.

Рис.1 иллюстрирует типичную топологию двухфазного осесимметричного течения между срезом сопла и обтекаемым телом (торец цилиндра) в потоке с частицами SiO_2 радиуса 6 мкм и отношением плотностей частиц и несущего газа в камере смешения равного 50%. Координаты отнесены к радиусу критического сечения равного 0.005 м. Давление и температура в камере смешения соответствовали 20 атм и 294 К. Струя истекает в затопленное пространство: значение степени нерасчетности (отношение давлений в аэродинамической установке и на срезе сопла) порядка единицы.

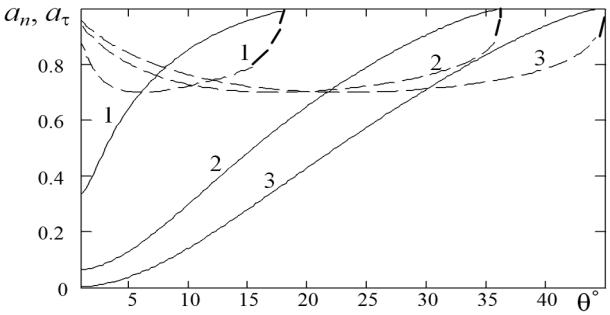

Рис.2а Коэффициент восстановления нормальной и тангенциальной компонент скорости частиц (a_n– сплошные линии, a_τ – штриховые), 1 – 0.5 мкм, 2 – 0.75 мкм, 3 – 1 мкм.

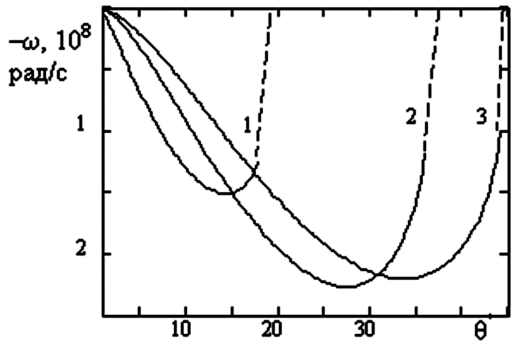

Рис.2б Изменение угловой скорости отразившихся частиц различных радиусов вдоль поверхности обтекаемого тела: 1 – 0.5 мкм, 2 – 0.75 мкм, 3 – 1 мкм.

На рис.2а дан пример распределения по поверхности коэффициентов восстановления нормальной и тангенциальной компонент скорости частиц при соударении с обтекаемым телом.

На рис.2б для тех же условий приведено распределение по поверхности тела угловой скорости частиц различного радиуса в момент их отражения. Видно, что вращение не возникает в точке томожения и при достижении некоторого значения, соответствующего касанию предельной траектории частицы. Отрицательные значения угловой скорости соответствуют вращению частиц по часовой стрелке в верхней полуплоскости осевого сечения потока.

ГАЗОТЕРМОДИНАМИКА СТРУИ, НАТЕКАЮЩЕЙ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО, И СЖАТОГО СЛОЯ ПЕРЕД НИМ

Описанная выше модель термодинамики отдельной частицы использована далее в правых частях уравнений потоков массы, импульса и энергии фаз, рассматриваемых в качестве взаимнопроникающих континуумов. При этом в выражения коэффициентов сопротивления и теплообмена включены полуэмпирические множители, учитываюшие стесненность диспергированной фазы (конечность объемной доли частиц). В качестве примера исследовано ускорение моно- и полидисперсного осесимметричного потоков в сопле и их взаимодействие со сферой при вращении частиц после их столкновения с телом.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из перспективных математических методов является метод крупных частиц [11]. Это сквозной метод, что обеспечивает возможность исследовать одновременно как дозвуковые, так и локальные сверхзвуковые зоны течения в струях и соплах. Метод основывается на идее расщеплении исходной системы уравнений по физическим процессам. Он опирается на дивергентные формы разностных уравнений, энергетическое равенство для полной энергии; при этом поновому трактуются этапы вычислительного цикла. Полагается, что каждый шаг по времени состоит из эйлерова, лагранжева и заключительного этапов. Динамика несущей среды описывается нестационарными уравнениями Эйлера. Для получения стационарного течения по времени используется метод установления. Кроме того, для исследования моно- и полидисперсных потоков достаточно присоединить лагранжев и заключительный этапы вычислительного цикла к общему алгоритму программы для режимов взаимодействия с малой концентрацией частиц. В режимах течения, в которых формируется поток хаотизированных частиц, имеющих собственное давление, необходимо использовать все этапы вычислительного цикла. Использование такого подхода особенно целесообразно в дисперсных потоках, когда имеют место различные временные масштабы физических явлений. Граничные условия для двухфазного течения на оси симметрии и свободных границах традиционны. Граничные условия при отскоке частиц от тела описаны в [8].

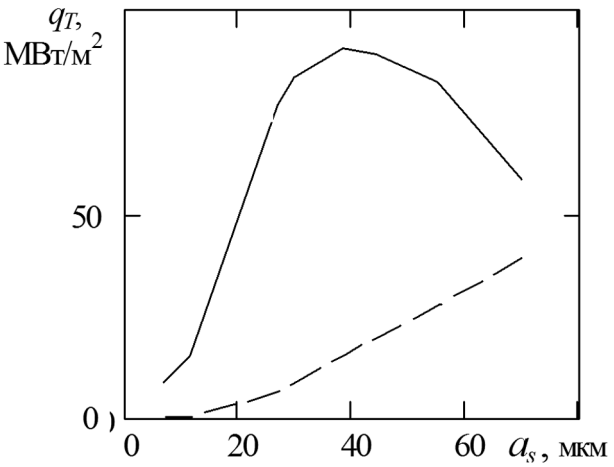

Рис.3 Плотность потока энергии, передаваемой частицами телу в критической точке: сплошная кривая – в случае монодисперсных потоков с одинаковой начальной массовой долей частиц 2,6%; штриховая кривая – вклад каждой из фракций полидисперсного потока с начальным массовым спектром при той же суммарной массовой доле.

Численные исследования проведены для характерного массового спектра частиц в виде набора нескольких фракций в диапазоне значений радиусов 1 – 70 мкм. На рис.3 показана соответствующая зависимость плотности потока энергии, передаваемого частицами телу в критической точке, от массового спектра частиц. Немонотонность q_T от a_s для монодисперсной смеси объясняется различной степенью скоростной релаксации частиц.

МАЖОРАНТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЖВУХФАЗНОЙ СМЕСИ, ОБТЕКАЮЩЕЙ ТВЕРДОЕ ТЕЛО

В литературе, посвященной исследованию электризации тел, движущихся в зыпыленной атмосфере, отмечаются трудности предсказания не только величины, но даже знака электрического заряда, приобретаемого отражающимися от тела микрочастиами.

Предложена простая модель электризации частиц, ускоренных сверхзвуковой струей и отражающихся от твердого тела с учетом их вращения, силы Магнуса, взаимного влияния вращательного и поступательного движения частиц относительно несущей среды. Всем частицам после столкновения с телом приписывается одинаковый электрический заряд, с учетом ограничения сверху локальным значением напряженности электростатического поля у поверхности частицы (мажорантная модель).

Получены предельные электрофизические характеристики двухфазного потока в окрестности твердого тела. В результате построены пространственные распределения электрического потенциала, поверхностное распределение плотности электрического тока и зависимость суммарного тока от радиуса и физических свойств частиц.

На рис.4 представлено характерное поле изолиний потенциалов, реализованное частицами Al_2O_3 радиусом 50 мкм при 2.6% содержании их в камере смешения. Результаты могут быть использованы при сопровождении экспериментов, в которых измеряются электрические токи, концентрации частиц у обтекаемого тела (например, оптическим методом).

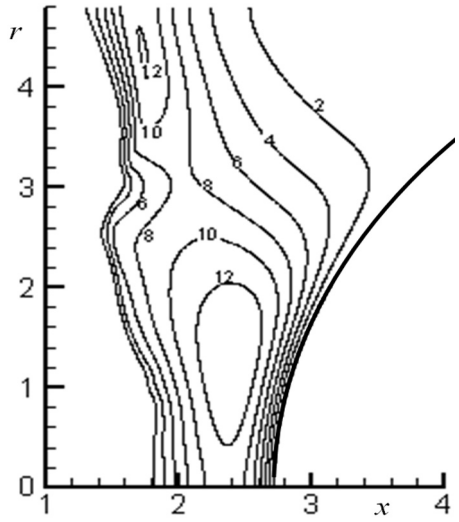

Рис.4 Изолинии потенциалов частиц Al_2O_3 радиусом 50 мкм, обтекающих сферу.

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ВОКРУГ ТЕЛА

Интенсивность света, рассеянного частицами в сжатом слое, и распределение плотности потока тепла по поверхности обтекаемого тела содержат богатую информацию об «элементарных» процессах взаимодействия твердых частиц с телом. Однако для извлечения этой информации из экспериментальных данных необходимо, в принципе, решать обратные задачи, относящиеся так называемым некорректно поставлены проблемам. При этом в качестве необходимого элемента выступает прямая задача, которую можно использовать как для контроля результатов, так и для выбора области параметров, в которой обеспечена единственнасть обратной задачи. Выполнены численные оценки влияния рассеяния частицами зондирующего монохромотического излучения на наблюдаемую картину свечения в плоскости лазерного «ножа».

На рис.5 дан пример распределения коэффициента ослабления излучения, падающего сверху (в плоскости рисунка), с длиной волны 1 мкм и рассеянного облаком частиц Fe_2O_3 радиусом 0.185 мкм. Поскольку в этом случае дифракционный параметр много меньше единицы, рассеяние является

почти релеевским. Для «крупных» частиц использована общая теория Ми, учитывающая оптические свойства материала частиц (диэлектрическую проницаемость и коэффициент электропроводности). В этом случае дифференциальное сечение рассеяния частицы несмммметрично относительно плоскости, перпендикулярной направлению излучения. Поэтому частицы, расположенные выше и ниже оси симметрии, дают различный вклад в суммарное излучение.

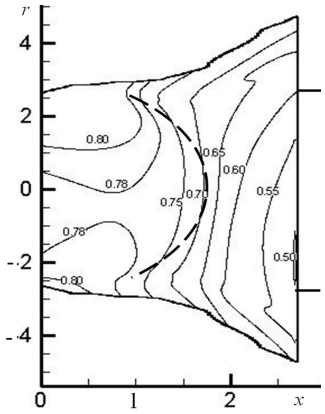

Рис.5 Изолинии коэффициента ослабления зондирующего излучения частицами Fe_2O_3 радиуса 0.185 мкм. Штриховая линия – скачок уплотнения.

ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ХАОСА ЧАСТИЦ

К настоящему времени построены сложные синтетические модели обтекания тел многофазным потоком, суммирующие уравнения Больцмана, Навье – Стокса, а также полуэмпирические модели турбулентности и столкновений частиц с твердым телом и друг с другом. В реальности входная информация, необходимая для таких моделей, характеризуется большой неопреленностью (в экспериментах частицы отличаются от шаровых, шероховатость обтекаемого тела не контролируется, справочные данные о материалах сталкивающихся тел имеют большой разброс, …). Эти факторы оправдывают тендецию создания упрощенных моделей, удовлетворяющих физическим законам сохранения и описывающих основные характерные черты исследуемого явления.

В настоящей работе для случая потока, содержащего большое количество частиц, предложена модель сжатого слоя с хаотизированной фракцией, обладающей собственным давлением и коэффициентом диффузии. Эта фракция возникает первоначально в результате столкновений налетающих на тело и отраженных от него частиц; затем облако хаотизированных частиц пропускает к телу лишь часть налетающих частиц, сталкиваясь как с ними, так и с отраженными.

В принципе, исход парного столкновения частиц описывается в системе их центра масс теми же коэффициентами восстановления нормальной и тангенциальной компонент скоростей частиц, что и при взаимодействии с телом. При этом должно происходить выделение тепла и повышение температуры частиц; однако этим явлением в настоящей работе пренебрегается.

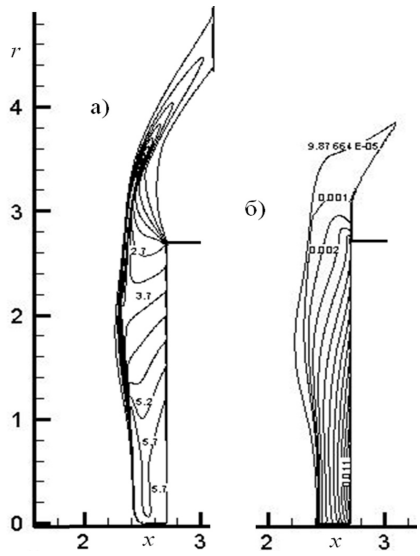

Рис.6 Линии равных значений массовой плотности частиц различных фракций: а) отраженных от торца цилиндра (с шагом 0.25 кг/м^3) б) хаотизированных в сжатом слое (с шагом 0.1 кг/м^3).

На рис.6 дано пространственное распределение плотностей двух фракций частиц у торца цилиндра, соответствующее рис.1. Скачок уплотнения расположен значительно левее огибающих этих распределений и на рисунке не показан. Получено, что с увеличением начальной массовой доли частиц в камере смешения слои отраженных и хаотизированных частиц у обтекаемого тела становятся все уже.

ВЫВОДЫ

Исследованы газодинамические параметры дисперсного потока в сопле и в сжатом слое около обтекаемого тела, а также параметры падающих, отраженных частиц различных окислов и металлов радиусом от 1 до 150 мкм.

Показано, что вращение частиц приводит к удалению каустики (огибающей траекторий отраженных частиц) от обтекаемого тела.

Отход каустики от тела мотонно растет с увеличением радиуса частиц.

Крупные частицы после отражения могут достигать скачка уплотнения перед обтекаемым телом и даже выходить за его пределы.

При обтекании сферы сверхзвуковой струей, в отличие от плоскопараллельного потока, реализуются немонотонные зависимости от радиуса частиц скорости их соударения с телом и передаваемого ими телу потока тепла в точке торможения.

Показано, что даже для случая оптически прозрачного облака частиц в сжатом слое у обтекаемого тела необходимо учитывать ослабление зондирующего луча на всей оптической трассе. Неучет этого физического явления может существенно исказить полученное из эксперимента пространственное распределение концентрации частиц.

Получены предельные электрофизические характеристики двухфазного потока в окрестности твердого тела и найдена величина силы тока через тело в зависимости от радиуса частиц и физических свойств их материала.

Развитые в настоящей работе физико-математическая модель и численный алгоритм можут быть использованы для сопровождения газодинамических экспериментов с целью извлечения информации о трудно измеряемых параметрах (коэффициентах восстановления скорости частиц, частоты их вращения после отражения,…) путем сравнения численных расчетов и результатов эксперимента.

Предложенный математический подход исследования дисперсных течений позволяет определить для любого набора «частица – обтекаемое тело» режим взаимодействия частицы с телом, от адгегии до эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке.– М.: Изд-во “Янус-К”.2007.– 392 с.
2. Стасенко А.Л. Физические аспекты многофазных течений в аэродинамике, летательной технике и авиационной экологии // Труды МФТИ.–2011.– Т. 3, № 4 (12).– С. 108 – 126.
3. Кудин О.К., Нестеров Ю.Н., Токарев О.Д., Флаксман Я.Ш., Яковлева Л.В. Теплообмен высокотемпературной струи запыленного газа с преградой // XXII Юбилейный семинар “Струйные, отрывные и нестационарные течения”. Тезисы докл. – С–Пб.: Изд-во СПбГУ.– 2010.– С. 80.
4. Vasilevsky E. B., Ershova T.V., Mikhatulin D.S., Yakovleva L.B. Physical effects arising at interaction of high speed dusty flow with a blunted body // Proc. 13 Intern. Heat Transfer Conf. 13–18 August 2006. Sydney. Austalia. Publ. by Begel House Inc. Book of Abstracts. – P. 38.
5. Volkov A.N., Tsirkunov Yu.M., Oesterle´B. Numerical simulation of a supersonic gas-solid flow over a blunt body: The role of inter-particle collisions and two-way coupling effects // Intern. J. Multiphase Flow.– 2005.– Vol. 31.– P. 1244–1275.
6. Матвеев С.К., Сеюкова Л.П. Обтекание диска и плоского торца цилиндра потоком газовзвеси // Течение вязкого и невязкого газа. Двухфазные жидкости (Газодинамика и теплообмен, вып. 6). – Л. : ЛГУ.1981. – С. .3 –12.

7. Лашков В.А. Об экспериментальном определении коэффициентов восстановления скорости частиц потока газовзвеси при ударе о поверхность // Инж.-физический ж.– 1991.– Т. 60. № 2.– С. 197– 203.
8. Стасенко А.Л. Коэффициенты восстановления скорости частицы при отражении от поверхности твердого тела // Инж.-физический ж. – 2007. – Т. 80, №5. –С. 38 – 44.
9. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Обтекание твердого тела горячей сверхзвуковой газодисперсной струей с учетом вращения отраженных частиц // Ученые записки ЦАГИ.– 2011. – Т. XLII, № 2. – С. 53 – 67.
10. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Мажорантная модель электризации сверхзвуковой газодисперсной струи, натекающей на твердое тело // Математич. моделирование –2011. – Т. 23, № 5. – С. 120 – 130.
11. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике.– М.: Наука. 1982.– 392 с.