

АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ

Описание взаимодействия двухфазных потоков с твердыми поверхностями обтекаемых тел является одной из актуальных задач механики, что обусловлено широким кругом проблем, возникающих в технических приложениях. К таким приложениям относятся: тепловая и эрозионная защита летательных аппаратов, движущихся в запыленной атмосфере; защита поверхности летательных аппаратов от обледенения; электризация самолетов, ракет и спускаемых аппаратов в облаках; защита стенок, центральных тел и рулей в соплах ракетных двигателей и др. Аналогичные задачи возникают при проектировании теплоэнергетических установок и химико-технологических аппаратов с двухфазным рабочим телом (теплообменников, камер сгорания, сушильных аппаратов), при производстве порошковых материалов, при «холодном» и плазменном напылении с использованием специально организованных высокоскоростных двухфазных струй, в современных технологиях нанесения микросхем с помощью аэрозольных пучков и многих других технологических процессах.

В перечисленных приложениях двухфазные потоки представляют собой смесь газа с частицами (твердыми или жидкими), объемная концентрация которых обычно мала, однако (из-за различия на несколько порядков плотностей фаз) проявляются эффекты инерционности частиц, а локальная массовая концентрация дисперсной фазы может достигать конечных значений. Наличие дисперсной примеси приводит к значительному изменению как локальных (например, местных коэффициентов трения и теплообмена), так и глобальных (положение ударных волн, структура отрывных зон) характеристик обтекания твердых поверхностей. В настоящее время для математического описания двухфазных сред типа «газ- инерционные частицы» широко используется модель взаимопроникающих континуумов, каждый из которых относится к определенной фазе вещества. Вблизи твердых границ структура двухфазных течений резко усложняется: здесь становятся определяющими эффекты вязкости и теплопроводности несущей фазы, что при математическом описании приводит к появлению малых параметров при старших производных. В межфазном обмене импульсом требуется учет "сдвиговости" потока, приводящей к поперечной миграции частиц под действием подъемных сил Сэфмана. В случае газочапельных течений на обтекаемой поверхности возможно образование жидкой пленки. Кроме того, именно вблизи твердых границ возникают локальные зоны пересечения траекторий частиц, разрывы параметров и узкие зоны накопления дисперсной фазы. Учет перечисленных факторов требует создания новых математических моделей, разработки комплексных

асимптотических и численных методов их исследования, а также постановки и проведения экспериментов с использованием специального оборудования и уникальных измерительных методик.

Выполненный под руководством А.Н. Осипцова цикл исследований был направлен на решение перечисленного выше круга проблем. В результате исследований получены следующие результаты.

1. Создана асимптотическая теория ламинарного двухфазного пограничного слоя. В рамках двухконтинуального подхода с использованием метода сращиваемых асимптотических разложений выведены уравнения пограничного слоя в запыленном газе с инерционными частицами. Проведена классификация возможных краевых задач двухфазного пограничного слоя и показаны их принципиальные различия для режимов с наличием и отсутствием инерционного осаждения частиц, для течений вдоль плоских и выпуклых поверхностей, а также проанализированы особенности постановок задач для нестационарного пограничного слоя. (Публикации [1, 4, 6, 9, 15, 25]).

В рамках полученных уравнений двухфазного пограничного слоя построены численные и асимптотические решения классических задач: о пограничном слое на пластине; в окрестности критических точек; в начальном участке плоского канала и круглой трубы; о двухфазном пограничном слое за ударной волной, движущейся вдоль твердой или разрушающейся поверхности. Обнаружены эффекты накопления малоинерционных частиц в пограничном слое, приводящие к резкому усилению теплообмена с обтекаемой поверхностью даже при очень малых концентрациях частиц во внешнем потоке. На основании численных решений проанализирована релаксация коэффициентов трения и теплообмена к равновесным значениям (определяемым моделью "эффективного" газа). Показано, что область квазиравновесного течения в пограничном слое на плоской пластине имеет "двухпалубную" структуру: в верхней области применимо автомодельное решение для однородного эффективного газа, а в нижней области имеет место стратифицированное течение с существенно неоднородным профилем концентрации частиц, вид которого определяется влиянием подъемных сил, действующих на частицы. (Публикации [1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 16]).

Дано обобщение постановки задач о двухфазном пограничном слое на случай фазовых переходов (испарения) на поверхности частиц (капель). На основе численного решения изучена структура пограничного слоя с испаряющимися каплями при обтекании

плоской нагретой стенки и горячего затупленного тела. Эффект резкой интенсификации теплообмена объяснен выпадением испаряющихся капель на обтекаемую поверхность под действием силы Сэфмана. Найдены параметры подобия, определяющие степень увеличения коэффициента теплообмена. Показано соответствие рассчитанных интегральных коэффициентов теплообмена участка поверхности экспериментальным данным, имеющимся в литературе. (Публикации [13, 14]).

Создана асимптотическая модель пристеночного двухфазного течения для режима инерционного осаждения капель и образования жидкой пленки на обтекаемой поверхности. В зависимости от значений безразмерных определяющих параметров даны различные предельные постановки задач пленочного течения (для "быстрого" и "медленного" течения пленки). На основе численных и асимптотических решений исследована структура пленочного течения на примере двухфазного обтекания лобовой поверхности затупленных тел. Определены условия, при которых наличие пленки значительно снижает тепловые потоки в стенку. (Публикация [7]).

Развита теория гидродинамической устойчивости плоскопараллельных течений дисперсных сред с учетом неоднородности концентрации частиц в основном течении, подъемных сил, действующих на частицы в сдвиговых потоках, и конечности объемного содержания дисперсной фазы. Определены диапазоны определяющих параметров, в которых наличие даже небольшой концентрации дисперсной примеси может существенно изменить границы ламинарного режима для течений в пограничном слое и плоском канале. (Публикации [28]-[30]).

2. Исследованы обтекание и теплообмен тел однородными и неоднородными аэродисперсными потоками. Разработана линейная теория стационарного обтекания крылового профиля до- и сверхзвуковым двухфазным потоком. Найдены диапазоны параметров, при которых наличие дисперсных частиц приводит к возникновению значительного дестабилизирующего аэродинамического момента, в некоторых случаях направленного в сторону уменьшения угла атаки. (Публикация [2]).

На основе численных решений с использованием схемы "невязкий поток плюс пограничный слой", а также полных уравнений Навье-Стокса для несущей фазы определены границы режима отсутствия инерционного осаждения частиц в пространстве определяющих параметров для задач сверхзвукового двухфазного обтекания затупленных тел. Обнаружен эффект накопления частиц вблизи лобовой поверхности затупленного тела, обтекаемого до-

и гиперзвуковыми двухфазными потоками в режиме отсутствия инерционного осаждения частиц. Проанализировано влияние дисперсной примеси на коэффициент трения и тепловой поток к обтекаемой поверхности и найдены параметры подобия, описывающие процессы трения и теплообмена в двухфазном потоке. Предсказано резкое увеличение теплового потока (до 100% и более) даже при малой (порядка нескольких процентов) массовой концентрации частиц в набегающем потоке. На примере численного решения задачи о двухфазном вдуве с лобовой поверхности затупленного тела, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа, показана возможность эффективного управления коэффициентом теплообмена с помощью распределенного двухфазного вдува в пограничный слой с обтекаемой поверхности. (Публикации [4, 5, 8, 12, 21, 27]).

Исследовано нестационарное поведение коэффициентов трения и теплообмена в критической точке затупленного тела, пролетающего с гиперзвуковой скоростью через область неоднородно запыленного газа. Для режима отсутствия инерционного осаждения частиц исследованы коэффициенты трения и теплообмена при пролете тела через гармонические неоднородности концентрации монодисперсных частиц, уединенный слой монодисперсных частиц, слой бидисперсной смеси частиц двух различных размеров и чередующиеся слои частиц различных размеров. Найдены границы применимости квазистационарного приближения для вычисления тепловых потоков и показано, что наиболее "опасными" (приводящими к наибольшим амплитудам тепловых потоков) являются неоднородности с характерным масштабом, на порядок превосходящим размер тела. (Публикации [20, 26]).

3. Совместно с сотрудниками ЦАГИ ИМ. Н.Е. Жуковского проведено экспериментальное исследование обтекания и теплообмена затупленных тел в сверхзвуковом потоке запыленного газа. На установке УТ-1М ЦАГИ проведено экспериментальное исследование обтекания и теплообмена затупленных тел (сфер и цилиндров) гиперзвуковым потоком слабозапыленного газа в широком диапазоне варьируемых инерционных свойств и материала частиц. Обнаружено резкое усиление коэффициента теплообмена и концентрации частиц на лобовой поверхности моделей при малых (порядка процента) массовых концентрациях частиц в набегающем потоке. Экспериментально подтвержден предсказанный теоретически в [4, 5] эффект усиления теплообмена в режиме отсутствия инерционного осаждения частиц. Для малых концентраций частиц экспериментальные данные по теплообмену и распределению концентрации частиц около тела согласуются с результатами теоретических расчетов.

Обнаружено новое явление – свечение областей течения вблизи лобовых поверхностей моделей, обтекаемых гиперзвуковым запыленным потоком при низкой температуре торможения газа.

Обнаружено возникновение значительных электрических потенциалов и плотностей тока на лобовой поверхности модели и изучена зависимость потенциала и плотности электрического тока от параметров запыленности потока. (Публикации [19, 21, 22, 23, 25]).

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Характерной особенностью большинства моделей многофазных сред является пренебрежение непосредственным взаимодействием частиц дисперсной фазы и их флуктуационными скоростями, вследствие чего дисперсная фаза обычно описывается уравнениями континуума, лишенного собственных напряжений. При этом несущая фаза, в общем случае, описывается уравнениями Навье-Стокса с источниковыми членами, учитывающими межфазное взаимодействие. В случае инерционных включений дисперсной фазы в некоторых областях течения траектории частиц могут пересекаться, образуя «сборки» и «складки» фазового объема, на границах которых плотность дисперсной фазы неограниченно (но, как правило, интегрируемым образом) возрастает. Обычные подходы, используемые для расчета течений разреженных дисперсных сред, можно разбить на две группы: эйлеровы и лагранжевы. Эйлерово описание является удобным, так как позволяет применять численные процедуры аналогичные тем, которые используются для расчета несущей фазы. Однако, эйлеровы подходы обладают неустранимым недостатком: они не позволяют исследовать течения, в которых возникают области накопления частиц, а также течения с зонами пересекающихся траекторий частиц. В стандартных лагранжевых подходах (методы "частиц-в-ячейках", метод Crowe С.Т. (ASME J. Fluid Engng., 1982, V. 104, 297-303) и др.), широко используемых в инженерной практике, отслеживается движение индивидуальных "частиц" (каждая из которых представляет конечный лагранжев объем дисперсной фазы), а затем применяется та или иная процедура осреднения по параметрам многих пробных "частиц", участвующих в расчетах. Такие методы требуют одновременного расчета траекторий очень большого числа "частиц", приходящихся на одну ячейку эйлеровой сетки (используемой для нахождения параметров несущей фазы), что приводит к неоправданно большим вычислительным затратам. Кроме того, такие методы не позволяют

корректно рассчитывать течения с пересекающимися траекториями частиц и зонами накопления частиц, вблизи которых даже малый лагранжевый объем дисперсной фазы претерпевает значительные деформации.

Новый альтернативный лагранжевый подход был развит в лаборатории механики многофазных сред в цикле работ А.Н. Осипцова с учениками. Суть этого подхода состоит в интегрировании вдоль выбранных траекторий частиц уравнения неразрывности дисперсной фазы, записанного в лагранжевых переменных. Возможность такого подхода обусловлена тем, что в большинстве моделей разреженных дисперсных сред межфазная сила считается известной функцией скоростей и температур фаз (иногда эта сила также зависит от производных от параметров несущей фазы по эйлеровым координатам и времени), но не зависит явно от концентрации частиц. Последнее условие позволяет вывести дополнительные дифференциальные уравнения для компонент якобиана перехода от эйлеровых к лагранжевым переменным и, таким образом, получить замкнутую систему обыкновенных уравнений и конечного соотношения (в общем случае трехмерного течения - систему ОДУ 24 порядка) на выбранной траектории частиц. С математической точки зрения это означает, что подсистема квазилинейных уравнений с частными производными первого порядка, относящаяся к дисперсной фазе, записывается в характеристической форме в лагранжевых переменных и сводится к системам обыкновенных дифференциальных уравнений на траекториях частиц, являющихся характеристиками. Решение указанной системы позволяет одновременно с расчетом выбранных траекторий частиц находить и значение плотности дисперсной фазы на траекториях-характеристиках. Данный подход позволяет с контролируемой точностью рассчитывать плотность среды частиц в областях накопления дисперсной фазы и в «складках» фазового объема (областях пересекающихся траекторий частиц). При этом легко находятся границы «складок» – на них якобиан преобразования от эйлеровых к лагранжевым переменным проходит через ноль. В работах, опубликованных сотрудниками лаборатории, данный метод был сформулирован в достаточно общем виде для криволинейных координатных систем. Рассмотрены важные частные случаи, в которых возможно значительное сокращение порядка системы уравнений, решаемых на каждой траектории. Указанный подход был развит на случай учета нестационарных эффектов при описании межфазного взаимодействия, которые важны в средах с близкими значениями плотностей фаз. Оказалось возможным также обобщение метода на случай, когда инерционные свойства дисперсной фазы (а, следовательно, и выражения для межфазного взаимодействия) являются функциями начальных лагранжевых координат (учет полидисперсности среды частиц). Наконец, развиваемый лагранжевый метод

был обобщен и на случай кинетического описания бесстолкновительной системы частиц дисперсной фазы с фазовыми переходами. Основные идеи метода описаны в работах [24], [30].

В работе [3] исследованы особые решения модели запыленного газа, связанные с описанием зон аккумуляции и пересечения траекторий частиц и приводящие к сингулярностям концентрации дисперсной фазы. Показана возможность возникновения интегрируемых и неинтегрируемых особенностей концентрации частиц, дана классификация особенностей и критерии применимости бесстолкновительной модели частиц.

Предложенный лагранжев подход был применен для исследования ряда важных задач динамики дисперсных потоков, в которых возникают зоны пересечения траекторий и аккумуляции частиц и исследование которых другими известными методами представляется затруднительным.

В работе [31] исследовано обтекание сферы сверхзвуковым неоднородно запыленным потоком. Рассмотрены различные типы неоднородностей, в том числе неоднородности инерционных свойств частиц (размера, массы, формы) в невозмущенном потоке. На основе параметрических численных расчетов были выявлены пространственные неоднородности (параметр инерционности частиц в неоднородностях зависит от одной пространственной координаты), которые приводят к аэродинамической фокусировке частиц различных сортов в ударном слое обтекаемого тела и неограниченной (в рамках модели невзаимодействующих частиц) кумуляции импульса и энергии дисперсной фазы, а следовательно и к возникновению пиковых тепловых потоков на лобовой поверхности обтекаемого тела. Обнаружение данного эффекта представляет значительный практический интерес для аэрокосмических приложений.

В работе [32] проведены численные расчеты движения инерционных монодисперсных частиц через стационарную конфигурацию, возникающую при регулярном и маховом взаимодействиях плоских ударных волн. Установлено, что за точкой взаимодействия ударных волн происходит аэродинамическая фокусировка частиц, их траектории пересекаются, и формируется узкая зона аккумуляции частиц. При регулярном симметричном и маховом взаимодействии в одну точку пространства могут приходиться три траектории частиц, а при регулярном несимметричном – от двух до четырех траекторий. В области пересекающихся траекторий концентрация частиц возрастает в десятки раз по сравнению с начальным значением. На основании расчетов определены области параметров,

в которых эффект фокусировки частиц максимален. Данный эффект может быть использован для развития технологий, использующих фокусированные пучки микрочастиц.

В работе [33] исследован класс стационарных автомодельных течений, формирующихся в окрестности критической точки при неортогональном столкновении двух различных несжимаемых потоков, один из которых содержит инерционные твердые частицы. Отдельно рассмотрен практически важный случай неортогонального натекания вязкой дисперсной среды на плоскую стенку. Показано, что в зависимости от значения параметра инерционности частиц возможны два режима течения: без проникновения и с проникновением частиц в область встречного потока. В первом случае малоинерционные частицы накапливаются вблизи поверхности раздела двух потоков, а концентрация частиц на контактной поверхности неограниченно возрастает. Задача натекания дисперсного потока на плоскую стенку решена с учетом обратного влияния частиц на несущую фазу. Показано, что в режиме отсутствия инерционного осаждения частиц, концентрация частиц на стенке резко возрастает, но остается конечной. Рассмотренный класс автомодельных решений является типичным локальным элементом многих пространственных аэродисперсных течений и поэтому представляет интерес для различных приложений.

В работе [34] проведено параметрическое исследование задачи центрифугирования инородных включений во вращающемся сферическом объеме самогравитирующей вязкой среды. Формулировка и анализ гидродинамической модели даны в общем виде, пригодном для описания различных явлений, в том числе формирования плотностных неоднородностей в ядрах жидких планет, разделения фаз в протопланетных газопылевых облаках, возникновения пылевых структур в вихревых атмосферных образованиях и пр. Включения моделируются континуумом, лишенным собственных напряжений. Массовая концентрация включений считается малой, конвекцией в несущей фазе пренебрегается. Для поля скоростей несущей фазы использовано аналитическое решение, соответствующее твердотельному вращению. Рассмотрено два случая межфазного взаимодействия - свободномолекулярный режим (что соответствует разделению фаз в протопланетных облаках) и континуальное обтекание при малых числах Рейнольдса с учетом стоксовой силы, сил Архимеда и присоединенных масс (что соответствует разделению фаз на ранней стадии формирования планет). Исследовались аналитические и численные решения для двух типов стационарных сферически симметричных граничных условий. В первом случае считалось, что тяжелые включения возникают на внешней границе сферического объема и движутся к центру объема, где они исчезают из рассмотрения. Во втором случае рассматривались легкие включения, стационарно возникающие вблизи центра объема и

движущиеся к периферии. Основной целью исследования было выяснение влияния вращения на формирование азимутальной анизотропии в радиальных распределениях концентрации включений и возникновение локальных зон накопления частиц. На основании параметрических расчетов показано, что с увеличением инерционности тяжелых включений в центральной части объема концентрация включений в экваториальной плоскости может заметно превосходить их концентрацию на оси вращения. При дальнейшем увеличении инерционности включений возникают пересечения траекторий частиц и складки фазового объема дисперсной среды. При этом в экваториальной плоскости формируются концентрические области накопления частиц, число которых увеличивается с увеличением инерционности включений. В данном случае азимутальная анизотропия концентрации частиц становится ярко выраженной. Для свободномолекулярного режима обтекания частиц показана возможность формирования линий растекания дисперсной фазы в экваториальной плоскости, что может моделировать границу «пылевых колец» планеты.

В работе [35] смоделировано формирование областей повышенной концентрации инерционной примеси в течении типа торнадо. Показано, что тяжелые частицы собираются на поверхности чашеобразной поверхности, начинающейся от основания вихря и расширяющейся кверху, причем верхний край этой поверхности закручивается в спираль вокруг некоторого кольца, положение и радиус которого определяется балансом сил тяжести, центробежных сил и сил аэродинамического сопротивления частиц.

В работе [36] рассмотрена задача о структуре пограничного слоя и подъеме пыли за ударной волной, движущейся с постоянной скоростью вдоль эродирующего слоя дисперсного осадка. В данной работе предложенный лагранжевым метод развит на случай конечного массового содержания частиц, с учетом влияния частиц на течение несущей фазы. Параметры несущей фазы рассчитываются на фиксированной эйлеровой сетке, а по отношению к членам, учитывающим обратное влияние частиц, применяются глобальные итерации, на каждом этапе которых поля параметров несущей фазы считаются известными с предыдущей итерации. Численные расчеты показали важность учета подъемных сил Сэфмана (обусловленных локальной сдвиговостью потока на масштабе частицы), под действием которых траектории частиц в пограничном слое за ударной волной отклоняются в сторону внешнего потока, и происходит формирование зон накопления частиц на внешней границе пограничного слоя. Данный эффект необходимо учитывать при оценке концентрационных пределов взрывобезопасности промышленных порошковых материалов.

Модель «холодного» континуума, лишенного собственных напряжений, широко используется и в других областях механики (при описании высокоскоростного

деформирования оболочек, глобального распределения вещества во Вселенной, движения «холодной» плазмы, автотранспортных потоков и др.), поэтому предложенный полный лагранжев метод имеет важное значение для развития различных областей механики сплошной среды.

ОТДЕЛЬНЫЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

В трехмерной постановке численно исследовано обтекание систем тел сверхзвуковым потоком газа. Рассмотрены пространственные конфигурации, состоящие из: конечного (до 30) числа сфер одинакового радиуса; и обтекание двух сфер различных радиусов с линией центров, перпендикулярной скорости набегающего потока. Исследована зависимость силы, действующей на каждое из тел, от расстояния до ближайших тел и от конфигурации ударных волн, возникающих внутри течения (И.А. Ждан и др [37]).

Совместно со сторонними организациями проведено теоретическое и экспериментальное исследование нового механизма кумуляции энергии и импульса при метании взрывом тонких пластин и оболочек. Разработаны способы оптимизации процесса кумуляции импульса за счет подбора начальной формы возмущения и распределения плотности метаемого образца, а также выбора схем нагружения (С.И. Зоненко и др. [38]).

На основе трехмерной кинетико-магнитогидродинамической модели проведены параметрические расчеты взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой для разных направлений и величин межзвездного магнитного поля. Получены трехмерные распределения параметров атомов и протонов в области гелиосферного интерфейса. Показано, что магнитное поле влияет на положение и асимметрию гелиосферной ударной волны в направлениях движения космических аппаратов Вояджер 1 и Вояджер 2 (В.В. Измоденов и др. [39]).

Совместно с учеными Университета Уппсалы и Королевского технологического института (Швеция) предложена новая математическая модель поликристаллической структуры земного ядра, объясняющая ряд экспериментальных данных по сверхнизким значениям модулей сдвига в твердом ядре Земли (А.Н. Осипцов А.Н. [40]).

Разработана иерархия двухконтинуальных моделей гравитационной конвекции суспензий и аэрозолей в замкнутых объемах с учетом нестационарных и наследственных сил в межфазном обмене импульсом. Для предельного случая оседания малоинерционных частиц в сильновязкой жидкости проведены численные расчеты развития вихревого течения в двумерных сосудах с наклонными стенками и даны количественные оценки известного экспериментального эффект ускорения процесса седиментации при отклонении стенок

сосуда от направления силы тяжести (Ю.А. Невский, А.Н. Осипцов, Е.С. Асмолов [41-44, 50]).

С помощью формализма уравнений Гамильтона изучена эволюция неодномерных возмущений в сплошной среде с параметрами, близкими к однородным. Для двух случаев учета влияния неоднородности фона получены аналитические формулы для характеристик возмущенного движения. Найдены точные стационарные решения для задач о распространении фронта пламени в гидродинамическом потоке, скорость которого является линейной функцией координаты, отсчитываемой вдоль фронта пламени (Н.Т. Пашенко и др. [45]).

Для теплового турбулентного пограничного слоя на пластине и в плоском канале со вдувом и отсосом установлены законы подобия для профилей температуры, турбулентного потока тепла, среднеквадратичной пульсации температуры и теплопередачи на стенке. Универсальный закон теплопередачи в форме обобщенной аналогии Рейнольдса позволил представить распределения теплового потока, соответствующие различным числам Рейнольдса, скоростям вдува и отсоса, с помощью функции одной переменной (И.И. Вигдорович [46-48]).

Многие исследования лаборатории выполнялись по заказам отраслевых предприятий нефтяной и газовой промышленности, а также центра “Космические технологии” и получали финансовую поддержку за счет грантов МНТЦ (проект 1549), INTAS (проект 00-0309), РФФИ (проекты 96-01-00313, 99-01-00088, 01-01-00467, 02-01-770, 08-01-00195 и др.), совместных грантов РФФИ и ГФЕН КНР (проекты 96-01-00017с и 99-01-39020а), грантов Шведской королевской академии наук, гранта Центра нанотехнологий университета Северной Дакоты (США), Британской Королевской Инженерной академии и др. Некоторые результаты, полученные в лаборатории (в частности, создание теории двухфазного пограничного слоя, разработка полного лагранжева метода), приобрели широкую международную известность. Данные, полученные при исследовании теплообмена затупленных тел в гиперзвуковых потоках, использованы в технических проектах, в частности, при разработке спускаемого на поверхность Марса летательного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Осипцов, О структуре ламинарного пограничного слоя дисперсной смеси на плоской пластине // Изв. АН СССР, МЖГ. 1980. №4. С. 48-54.
2. А.Н. Осипцов, Тонкий профиль в потоке дисперсной смеси // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. №5. С. 147-154.
3. А.Н. Осипцов, Исследование зон неограниченного роста концентрации частиц в дисперсных потоках // Изв. АН СССР, МЖГ. 1984. №3. С. 46-52.
4. А.Н. Осипцов, Пограничный слой на затупленном теле в потоке запыленного газа // Изв. АН СССР, МЖГ. 1985. №5. С. 99-107.
5. А.Н. Осипцов А.Н., Е.Г. Шапиро, Влияние мелкодисперсной примеси на структуру пограничного слоя при гиперзвуковом обтекании затупленного тела // Изв. АН СССР, МЖГ. 1986. №5. С. 55-62.
6. А.Н. Осипцов, Движение запыленного газа в начальном участке плоского канала и круглой трубы// Изв. АН СССР, МЖГ. 1988. №6. С. 80-87.
7. А.Н. Осипцов, Е.Г. Шапиро, Обтекание поверхности аэродисперсным потоком с образованием жидкой пленки из осаждающихся частиц // Изв. АН СССР, МЖГ. 1989. №4. С. 85-92.
8. А.Н. Осипцов, Е.Г. Шапиро, Обтекание сферы запыленным газом с большой сверхзвуковой скоростью // В сб.: Исследование газодинамики и теплообмена сложных течений однородных и многофазных сред. М.: Изд. Московск. ун-та. 1990. С. 89-105.
9. С.Л. Веселый, А.Н. Осипцов, Пограничный слой в запыленном газе со сжимаемой несущей фазой // Вестник МГУ. Сер.1. Математика, механика. 1990. №3. С. 51-56.
10. A.N. Osipstov, S.L. Veselyi, V.A. Kulikovskii, B.Y. Wang, The flow structure of dilute gas-particle suspensions behind a shock wave moving along a flat surface // Appl. Math. Mech. 1991. V. 12. №6. С 531-538.
11. B. Y. Wang, S.L. Veselyi, V.A. Kulikovskii, A.N. Osipstov. The distribution of particles in a shock-induced boundary layer of a dusty gas over a solid surface // Acta Mechanica Sinica, 1991, v.7, №2, 117-122.
12. А.Н. Осипцов, Е.Г. Шапиро, Двухфазный вдув с лобовой поверхности затупленного тела в гиперзвуковом потоке газа// Изв. РАН, МЖГ, 1992, №4, 60-66.

13. A.N. Osipov, E.G. Shapiro, Heat transfer in the boundary layer of a "gas-evaporating drops" two-phase mixture // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993. V. 36. №1, 71-78.
14. А. Н. Осипов, Д. В. Коротков, Пограничный слой в паракапельной среде на лобовой поверхности горячего затупленного тела// *ТВТ*. 1998. Т. 36. №2. С. 291-297.
15. А. N. Osipov, Mathematical modeling of dusty-gas boundary layers// *Appl. Mech. Rev.*, 1997, v.50, №6, 357-370.
16. Ван Бо-И, А. Н. Осипов, Пристеночный пограничный слой за ударной волной в запыленном газе// *Изв. РАН, МЖГ*. 1999. №4. С. 61-73.
17. А. N. Osipov, Modified Lagrangian method for calculating the particle concentration in dusty-gas flows with intersecting particle trajectories// *Proc. 3d Intern. Conf. Multiphase Flow*. Lyons, France, June 8-12, 1998. CD. P. 1-8.
18. А. Н. Осипов, М. А. Теверовский, Гиперзвуковое обтекание сверхзвукового двухфазного источника// *Изв. РАН, МЖГ*. 1998. №3. С. 134-147.
19. E. B. Vasilevskii, A. V. Chirikhin, A. N. Osipov. Heat transfer to a stagnation region of a blunt body in a hypersonic flow with an admixture of solid particles// In: *Proc. 3d Europ. Symp. Aerothermodyn. Space Vehicles*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 24-26 November 1998. ESA SP-426, pp. 301-307.
20. А. N. Osipov, A. V. Rozin, B. Y. Wang. Non-stationary effects in hypersonic nonuniform dusty-gas flow past a blunt body// *Acta Mechanica Sinica*, 1999, v. 15, №3, 201-214.
21. А. N. Osipov, E. B. Vasilevskii. Heat transfer in a stagnation region of a blunt body in a hypersonic gas flow with an admixture of tiny particles. Theory and first experimental results// In: *Proc. Intern. Conf. Two-Phase Flow Modell. Experim. Italy. Pisa*. 1999, v. 3, pp. 1893-1900.
22. E. B. Vasilevskii, A. N. Osipov, Experimental and numerical study of heat transfer on a blunt body in dusty hypersonic flow// *AIAA Paper №99-3563*, 1999, pp. 1-11.
23. А. N. Osipov, E. B. Vasilevskii. Supersonic Dusty-Gas Flow Past a Blunt Body and the Heat Transfer Problem// *Proc. Intern. Conf. Multiphase Systems*. Ufa. Bashkortostan. Russia. June 15-17. 2000. P. 113-118.
24. A.N. Osipov, Lagrangian modelling of dust admixture in gas flows, *Astrophys. Space Sci.*, 2000, v. 274, 377-386.

25. Э.Б. Василевский, А.Н. Осипцов, А.В. Чирихин, Л.В. Яковлева, Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела в высокоскоростном потоке, содержащем малоинерционные частицы // ИФЖ. 2001. Т.74. №6. С. 29-37.
26. А.Н. Осипцов, Нестационарный пограничный слой на затупленном теле в гиперзвуковом потоке неоднородно запыленного газа// Изв. РАН, МЖГ. 2001. №5. С. 107-120.
27. Л.А. Егорова, А.Н. Осипцов, В.И. Сахаров, О границах режима инерционного осаждения частиц и теплообмене при сверхзвуковом обтекании тел вязким запыленным газом// Изв. РАН, МЖГ. 2001. №6. 111-124.
28. С.А. Боронин, А.Н. Осипцов. Устойчивость течения дисперсной смеси в пограничном слое// Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 1. С. 76-87.
29. С.А. Боронин. Исследование устойчивости течения суспензии в плоском канале с учетом конечной объемной доли частиц // Изв. РАН. МЖГ. 2008 № 6. С. 40-53.
30. Осипцов А.Н., Развитие лагранжева подхода для моделирования течений дисперсных сред// В сб. «Проблемы современной механики» (К 85-летию акад. Г.Г. Черного), Изд. МГУ, 2008. С. 390-407.
31. Егорова Л.А., Осипцов А.Н., Сахаров В.И., Аэродинамическая фокусировка полидисперсных частиц при обтекании тел запыленным газом// Докл. РАН. 2004. Т.395.№ 6. С. 767-771.
32. Голубкина И.В., Осипцов А.Н., Аэродинамическая фокусировка инерционных частиц в области пересечения ударных волн//Изв. РАН, МЖГ. 2007. №4. С.107-116.
33. Лебедева Н.А., Осипцов А.Н., Течения вблизи критических точек при несимметричном столкновении вязких дисперсных потоков// Изв. РАН, МЖГ. 2007. №5. С. 75-87.
34. Ахуджа Р., Белоножко А.Б., Йоханссон Б., Осипцов А.Н., Инерционное разделение фаз во вращающихся самогравитирующих средах// Изв. РАН, МЖГ. 2004. №6. С. 85-99.
35. Н.А. Лебедева, А.Н. Осипцов, Зоны аккумуляции дисперсной примеси в течении типа торнадо// Изв. РАН. МЖГ. 2009. №1.
36. Wang B.Y., Xiong Y., Osipov A.N., Two-way coupling model for shock-induced laminar boundary-layer flows of a dusty gas// Acta. Mech. Sinica. 2005. V. 21. P. 557-563.
37. И.А. Ждан, В.П. Стулов, П.В. Стулов, Трехмерные конфигурации фрагментов разрушенного тела в сверхзвуковом потоке// Докл. РАН. 2005. Т. 404. № 4.
38. А.Н. Голубятников, С.И. Зоненко, Г.Г. Черный, Новые модели и задачи теории аккумуляции // Успехи механики. 2005. Т. 3. №1. С. 31-93.

39. В.В. Измоденов, Структура и свойства внешней гелиосферы . Глава 3.7 в коллективной монографии «Плазменная гелиогеофизика» (под ред. Л.М. Зеленого). Т.1. С. 358-376. М.: Наука, 2008.
40. A.V. Belonoshko, S. Davis, N. Skorodumova, A.N. Osipov, A. Rosengren, B. Johansson, Origin of the low rigidity of the Earth's inner core// Science. 2007. V. 316. P. 1603-1605.
41. Ю.А. Невский, А.Н. Осипцов, О роли нестационарных и наследственных сил в задачах гравитационной конвекции // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 1. Мат. Мех. 2008. N 4 С. 37—44.
42. Ю.А. Невский, А.Н. Осипцов, Моделирование гравитационной конвекции суспензий// Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. №7. С. 98-106.
43. Е.С. Асмолов, Численное моделирование осаждения разреженной суспензии в контейнере// Изв. РАН. МЖГ, 2007, №3, с. 84-93.
44. E.S. Asmolov, Fluctuating interface in a dilute sedimenting suspension// Phys. Rev. E. 2007. V. 76. P. 016309.
45. А.Г. Куликовский, А.В.Лозовский, Н.Т. Пащенко, О развитии возмущений на слабонеоднородном фоне// ПММ. Т.71. №5. 2007.
46. И.И. Вигдорович, Закон дефекта температуры и универсальный закон теплопередачи и для турбулентного пограничного слоя на пластине с отсосом// Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 5. С. 629-634.
47. И.И. Вигдорович, Тепловой турбулентный пограничный слой на проницаемой пластине// ЖЭТФ. 2007. Т. 131. Вып. 6. С. 1115-1133.
48. I. Vigdorovich, M. Oberlack, Analytical study of turbulent Poiseuille flow with wall transpiration // Phys. Fluids. 2008. V. 20. № 5. С. 055102-1 – 055102-9.
49. А.Н. Осипцов, О.Д. Рыбдылова. Фокусировка аэрозоля за ударной волной, движущейся в микроканале// Теорет. основы хим. технол. 2011. №2. С. 178—186.
50. Ю.А. Невский, А.Н. Осипцов. Медленная гравитационная конвекция дисперсных систем в областях с наклонными границами// Изв. РАН. МЖГ. 2011. №2. С. 65—81.
51. И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов, В.И. Сахаров. Обтекание плоского цилиндра сверхзвуковым слабозапыленным потоком при взаимодействии головной ударной волны с косым скачком уплотнения// Изв. РАН. МЖГ. 2011. №1. С. 70—84.
52. Г.М. Варгафтик, А.Н. Осипцов. Пленочное кипение на горячем затупленном теле в потоке жидкости// Изв. РАН. МЖГ. 2011. №6. С. 118—129.
53. А.Н. Осипцов, Е.С. Попущина. Асимптотическая модель медленного трехмерного течения пленки жидкости в космическом каплеуловителе// Изв. РАН. МЖГ. 2012. №6. С. 87—98.