

УДК 532.5+629.7

*А. Л. Стасенко*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского

Физические аспекты многофазных течений в аэродинамике, летательной технике и авиационной экологии

Дан краткий обзор физико-математических моделей высокоскоростных неоднородных потоков, их численных и экспериментальных исследований, выполненных сотрудниками МФТИ (ФАЛТ) и ЦАГИ в течение более сорока лет с учётом специфики летательной техники (широких диапазонов изменения давлений, температур несущего газа, электризации и теплового излучения частиц, их отражения от обтекаемых тел, вращения и дробления капель). Рассмотрен широкий круг конкретных приложений — от криогенных аэродинамических труб и обледенения самолёта до пожаротушения с воздуха; от ракетного старта до входа в запылённые атмосферы планет; от визуализации вихревых следов в окрестности аэропорта до пылевых потоков в голове кометы.

Ключевые слова: многофазный неравновесный поток; дисперсия звука; отскок, вращение, электризация и оптика частиц; аэрофизический эксперимент; обледенение самолёта; вихревая безопасность; пожаротушение с летательного аппарата; струи в вакууме; вход в атмосферу.

1. Введение

К настоящему времени механика многофазных сред — хорошо развитая область неравновесной газотермодинамики, достижения которой изложены в отечественных монографиях [1–9], в основном в приложении к проблемам энергетики, машиностроения, течениям в соплах. Одновременно с этими работами в МФТИ и ЦАГИ развивались исследования полидисперсных потоков с учётом специфики аэродинамического эксперимента, авиационной экологии и физики полёта в различных условиях — от аэропорта до высоких слоёв атмосферы и космического пространства. Юбилей МФТИ предоставляет возможность сделать обзор развитых нами математических моделей, их экспериментальной верификации и полученных на данной основе результатов в течение нескольких десятков лет.

В этот юбилейный год уместно вспомнить, что Физтех начался с Аэромеха. Это не случайно: летательный аппарат является венцом технической цивилизации, в котором объединены все разделы физики — от механики точки до квантовой теории вещества и астрофизики — и учтены все последние достижения различных технологий. Только высокоразвитые страны могут создавать летательную технику, и то часто в кооперации: например, «Конкорд» является англо-французским изделием, в то время как Россия создала Ту-144 самостоятельно.

Несмотря на то, что полёт из мечты превратился в бытовое явление, в гражданской авиации остались от прошлого и родились в последние годы серьёзные проблемы, часть которых рассматривалась на конференциях МФТИ: экология атмосферы (возможное истощение озонового слоя, образование облаков под влиянием выбросов двигателей); экология интенсивно работающих аэропортов (генерирование самолётами и распространение спутными вихрями и ветром в их окрестности нежелательных веществ, образование подпочвенных «линз» с компонентами топлива); вихревая опасность, связанная с возможностью чисто механического возмущения атмосферы над аэропортом большими авиалайнерами; опасность обледенения при полёте в облаках с переохлаждёнными метастабильными каплями, тесно связанная с электризацией аппарата; оптимизация пожаротушения с воздуха.

Ниже дан краткий обзор физических аспектов и некоторых результатов исследований этих проблем. Для их полного решения необходимы усилия многих научных коллективов. Наши выпускники должны принять активное участие в этом процессе.

В связи с юбилейным статусом настоящего сборника нами упомянуты в основном собственные работы, а также работы других авторов, способствовавшие развитию наших исследований. Полученные результаты частично вошли в наши монографии [6, 8] и учебные пособия МФТИ [10], а также докладывались на многочисленных научных форумах и рабочих встречах как в России, так и за рубежом, с представителями ONERA, Boeing, British Aerospace, Yuväskulä University (Finland), International Center for Theoretical Physics (Trieste, Italy).

2. Отдельная частица в несущем газе

Построение математической модели газодисперсного или парок капельного течения естественно начать с описания обмена импульсом, энергией и массой между отдельной частицей и безграничным несущим потоком. Между тем для создания строгой модели любого из этих «элементарных» актов потребовалась бы вся газотермодинамика и физическая кинетика. Поэтому при исследовании, например, динамики капли уже сотню лет назад использовались полуэмпирические интерполяции. Так, в классических работах Милликена по измерению электрических зарядов капель, падающих в воздухе [11], использовался поправочный множитель, учитывающий факт разреженности газа для мелких частиц (в зависимости силы сопротивления от числа Кнудсена $Kn = l/2a$, построенного по длине свободного пробега молекул l и диаметру капли $2a$). При этом экспериментатор опирался на более раннюю работу [12].

При теоретическом исследовании газодисперсных потоков в аэродинамике и летательной технике необходимо знать силу взаимодействия частицы с газом при произвольных значениях не только числа Кнудсена, но и числа Маха $M_2 = |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2|/c_1$ (c_1 — скорость звука в газе, $\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2$ — скорость обтекания частицы). К настоящему времени существуют многочисленные полуэмпирические интерполяции экспериментальных данных для шара, полученные в отдельных интервалах значений чисел $Kn, M_2, Re_2 = 2a\rho_1 |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2|/\mu_1$ (μ_1 — вязкость несущего газа). Сейчас наиболее часто применяется кусочно-непрерывная зависимость [13] для силы сопротивления. Но, поскольку для наших целей к тому же необходимо знать скорость тепло- и массообмена частиц, в работах [14–16] разработан и использован более простой интерполяционный алгоритм, один и тот же для потоков массы, энергии, импульса и момента импульса. Кроме того, полученные выражения учитывают дополнительно объёмную неизотермичность частицы [17] и последние экспериментальные данные [18] о взаимном влиянии поступательного и вращательного движений частицы. Специальное внимание уделено также собственному тепловому излучению частицы с учётом обрезания спектра со стороны длин волн, сравнимых с её размером [19].

В работе [20] рассмотрена механика и тепломассообмен вращающейся капли в следующих аспектах: во-первых, мелкодисперсные частицы могут попадать в условия свободно-молекулярного обтекания уже в сопле вследствие быстрого расширения несущего газа либо вводиться в заведомо разреженную (относительно частиц) среду; во-вторых, появление при вращении боковой силы (типа Магнуса) должно приводить к поперечному смещению частиц и перепутыванию их траекторий; в-третьих, существует область параметров частиц и обтекающего газа, в которой время выравнивания температуры в объёме частицы сравнимо с временами других релаксационных процессов, что приводит к необходимости решать уравнение теплопроводности внутри вращающейся деформированной капли; в-четвёртых, как собственное излучение мелкой (сравнимой с характерной длиной волны) частицы, так и приходящее извне излучение, рассеянное ею, зависит от формы частицы [21], что, вообще говоря, может привести к отличию оптических характеристик парок капельного потока с вращающимися частицами от таковых в отсутствие вращения. Из возможных взаимных положений векторов скорости обтекания и угловой скорости вращения частицы выбран

случай их ортогональности, $\omega \perp (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)$, имеющий непосредственное отношение к механике двухфазных струй.

В [20] получена система уравнений динамики и теплообмена вращающейся эллипсоидальной частицы, численно исследовано изменение вдоль оси сопла её линейной и угловой скоростей, эксцентриситета, а также эволюция температурного поля внутри капли. Кроме того, даны индикатрисы рассеяния плоской монохроматической неполяризованной электромагнитной волны на эллипсоидальной частице при двух направлениях падения: параллельно экваториальной плоскости и оси симметрии.

Влияние большой разности температур на скорость массообмена капли, неподвижной относительно газа, аналитически и численно исследовано в [22–24] с учётом эффектов Соре и Дюфура, а также зависимости коэффициентов переноса от температуры и концентраций компонентов бинарной (пассивный газ плюс пар вещества капли) газовой смеси.

Несмотря на большой объем накопленной в мире информации о взаимодействии частиц с несущим газом, нами были проведены самостоятельные эксперименты [25] для подтверждения сформулированной системы уравнений динамики капель. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования кинематических характеристик микрочастиц в невозмущённом сверхзвуковом потоке газа и за скачком уплотнения (при помощи лазерно-доплеровского измерителя скорости) позволило подтвердить принятую модельную систему уравнений динамики частиц, оценить размер последних в момент прохождения скачка и выяснить характер дробления за скачком.

Было показано, что частицы воды радиусом $\sim 5\text{--}10$ мкм при охлаждении ниже точки замерзания в сверхзвуковом потоке воздуха оставались в жидком метастабильном состоянии, что оказалось важным при исследовании обледенения тел в потоке. За скачком уплотнения частицы проходили значительное расстояние (~ 1 см), прежде чем возникала достаточная для их распада деформация. Это расстояние хорошо совпадает с оценками, основанными на экспериментальных данных других авторов для «тёплых» крупных (~ 1 мм) капель, если при определении чисел Вебера и Лапласа использовать значения вязкости для переохлаждённой жидкости, полученные экстраполяцией данных для воды в область температур ниже точки замерзания. Деформация частиц завершалась их распадом на большое количество ($10^2\text{--}10^3$) мелких, которые двигались далее как недеформируемые сферы.

Значительное внимание уделено такому «элементарному» процессу, как испарение капель. На основе экспериментов с каплями жидкого азота, свободно падающими в атмосферном воздухе [26, 27], построена математическая модель изменения массы частицы, обдуваемой несущей средой, при значительном отличии их температур (в экспериментах $T_1/T_2 \approx 4$).

3. Соударение частицы с твёрдым телом: от адгезии до эрозии

При обтекании тел высокоскоростным двухфазным потоком важную роль играет физика столкновения микрочастицы с поверхностью. В частности, структура сжатого слоя существенно зависит от компонент скорости отскока частиц. Этот процесс относится скорее к физике твёрдого тела, чем к аэродинамике, однако при численном исследовании движения тела в двухфазной среде приходится принимать ту или иную модель «элементарного акта» столкновения частицы с телом. При этом в большинстве случаев расчёты проводятся в довольно произвольных предположениях относительно коэффициентов восстановления нормальной $a_n = -v_{rn}/v_{in}$ и тангенциальной $a_\tau = v_{r\tau}/v_{i\tau}$ компонент импульса частицы. Здесь индекс i (*incident*) означает до соударения с телом, r (*rebound*) — после отражения от тела. В некоторых работах полагается $a_n = a_\tau = 0$ (прилипание или исчезновение частиц на поверхности) либо $a_n = a_\tau = 1$ (зеркальное отражение); либо делается заявление типа «примем a_n и a_τ равным 0,5», либо в лучшем случае используются полуэмпирические интерполяции результатов экспериментов, пригодные, разумеется, только для исследованной пары сталкивающихся тел. Поэтому нами была поставлена задача получить «универсальные» зависимости a_n и a_τ от физико-механических свойств налетающей частицы и мишени,

опирающиеся на известные опытные данные. Естественно предположить, что исход столкновения зависит как от скорости V_i частицы, так и от плотности, модуля Юнга и сдвига, пределов текучести, поверхностных плотностей энергии обоих участников взаимодействия.

Предложенная нами модель [28, 29] опирается на два предельных значения скоростей V_i^a и V_i^* , соответствующих адгезии и началу эрозии. Вне этого интервала частицы либо прилипают к поверхности ($V_i < V_i^a$), либо происходит необратимая деформация частиц и поверхностного слоя бомбардируемого тела ($V_i > V_i^*$), а внутри интервала — отскок частиц, который и представляет интерес с точки зрения газотермодинамики двухфазного потока. При формулировании адгезионного предела V_i^a использованы, в частности, материалы статей [30–33], а для эрозионного предела V_i^* — [34–36].

Слипание тел при кратковременном контакте в зависимости от их температуры и при пониженном давлении исследовалось нами экспериментально в барокамере [37] и при полете в стратосферу геофизической ракеты «Янтарь». Предложенные в [28, 29] выражения не претендуют на единственность, поскольку на поле экспериментальных точек можно наложить бесконечно много аналитических кривых (тем более что использованные в опытах частицы не всегда были сферическими). Однако проведённая «привязка» к физическим свойствам твёрдого тела позволяет надеяться, что предлагаемые формулы будут приемлемы и для других пар веществ частиц и бомбардируемой ими поверхности.

В ряде работ коэффициенты a_n и a_τ выражают через коэффициент трения [38]. В связи с этим нами предложена [39] «универсальная» формула, выражающая его в терминах физико-механических свойств материалов трущихся друг о друга тел (упомянутых выше модулей Юнга, сдвига и пределов текучести).

Полученные соотношения использованы в [40].

4. Газотермодинамика и кинетика полидисперсного турбулентного потока

В работах [41–43] использованы предложенные интерполяционные формулы для потоков массы, импульса и энергии на частицу и получена *основная система уравнений* динамики смеси пара, который может конденсироваться, и «крупных», непосредственно не взаимодействующих друг с другом частиц того же вещества, которые могут изменяться за счёт поверхностных фазовых переходов. Частицы предполагаются распределёнными по размерам, их собственный объем не учитывается.

Предположение об отсутствии агломерации и дробления частиц позволяет заменить кинетическое уравнение для их массового спектра уравнением сохранения их числа.

Основная система состоит из трёх подсистем: системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение массы, импульса и энергии частицы вдоль её траектории; цепочки обыкновенных дифференциальных уравнений для первых трёх моментов функции распределения частиц гомогенного конденсата по их радиусам (Ω -цепочки); системы уравнений динамики идеального совершенного газа, в правые части которых входят распределённые источники массы, импульса и тепла, связанные с наличием диспергированной фазы.

Получены точные оценки сверху и снизу для массы частицы, движущейся в расширяющейся равновесной смеси и в вакууме. Показано, в частности, что частица, попавшая в вакуум, не может полностью испариться (или сублимировать) в отсутствие внешних источников энергии.

В [43] дано обобщение соотношения А. А. Фридмана для завихренности потока газа на случай неоднородной смеси. Показано, что влиянием начального вращения частиц на пространственное распределение скоростей газа можно пренебречь с не меньшей точностью, чем вязкостью несущей среды, ускоряющей частицы, что позволяет опустить уравнение для плотности внутренних моментов импульса газа.

В произвольной криволинейной системе координат записана система уравнений газотермодинамики неоднородной смеси частиц с вязкой теплопроводной несущей средой, при-

годная для описания ламинарных и турбулентных течений. В последнем случае система замкнута соотношением Прандтля для турбулентной вязкости и принято предположение о косвенном влиянии диспергированных частиц на характеристики турбулентности через осреднённые параметры несущей среды. Приведена параболизированная система уравнений (в недивергентной форме в цилиндрической системе координат), предназначенная для использования численных методов, основанных на расщеплении по физическим переменным.

Создан набор программ, позволяющий численно исследовать задачи динамики неадиабатических смесей различных классов сложности — от траекторных задач о движении отдельной частицы в поле газодинамических параметров до задач о движении смеси с большим относительным содержанием частиц [44–52]. Этот набор программ позволяет исследовать движения полидисперсной смеси любой размерности (плоские и осесимметричные стационарные и нестационарные) от форкамеры до произвольно далёких от среза сопла областей струи, истекающей в вакуум, или затопленной сверхзвуковой струи (в частности, в спутном потоке).

Теоретические исследования параметров сверхзвуковых неадиабатических струй с догорающими частицами связаны с определёнными трудностями физического и вычислительного характера и нуждаются в создании простейших моделей, которые отражали бы существенные черты межфазного обмена массой, импульсом и энергией с учётом выделения теплоты химической реакции. В [53] предложена простая модель, основанная на следующих предположениях: вещество частицы представляет собой нелетучий элемент, обладающий летучим окислом; иными словами, температура кипения окисла ниже, чем температура вещества частицы; реакция идёт на поверхности частицы, её теплота идёт на нагрев частицы, а затем, в результате теплообмена, в газ; реакция соответствует стехиометрическому соотношению горючего и окислителя; частица объёмно изотермична и остаётся сферической; внутри частицы не происходит фазовых переходов (плавления или отвердевания); газ струи и газ спутного потока считаются идеальными, с различными, но постоянными показателями адиабаты; вязкость и теплопроводность газа проявляется только при взаимодействии с частицами; суммарным объёмом и давлением частиц пренебрегается.

В более развитых численных кодах использованы известные модели кинетики частиц, сталкивающихся друг с другом за счёт турбулентных пульсаций несущей среды [54, 55], а также результаты прямого численного моделирования этого процесса [56].

5. Акустика газодисперсной смеси

Понятие скорости звука является фундаментальным в высокоскоростной газодинамике. Как известно, картины обтекания даже простого тела (например, клина) резко отличаются в случаях до- и сверхзвукового потоков.

Ситуация осложняется, если в потоке происходят один или несколько релаксационных процессов, каждый из которых характеризуется своим временем релаксации τ_j . При этом на графике зависимости скорости звука от частоты $c(\omega)$ в окрестности значения $\omega_j = 2\pi/\tau_j$ появляется перегиб, а на кривой коэффициента затухания (на длину волны) — резонансный пик [57]. В результате, например, «линия Маха» перестаёт быть линией и превращается в пространственную область, заключённую между углами $\theta_{\min} = \arcsin(c_{\min}/u)$ и $\theta_{\max} = \arcsin(c_{\max}/u)$. (Аналогичное явление для случая химической реакции в потоке рассмотрено в [58].) В наших статьях [59, 60] учтены не только скоростная релаксация частиц и теплообмен между газом и поверхностью частицы, но и выравнивание температуры вообще неизотермической частицы по её объёму, лучистый теплообмен между частицами, а также исследовано влияние функции распределения частиц по размерам на дисперсионные свойства неадиабатической среды.

Распространение электромагнитного излучения в среде, содержащей шаровые частицы диспергированного вещества, при произвольном отношении размера частиц и длины волны излучения и для любых свойств материала частицы описывается весьма сложной теорией Ми. Нами этот процесс рассмотрен на базе следующих двух моделей, приводящих к ка-

чественно одинаковым результатам: модель конечного объёма излучения (предполагается, что на фиксированную частицу, тепловой баланс которой исследуется, падает излучение только тех частиц, которые находятся внутри некоторого объёма влияния, ограниченно-го сферой в случае равновесия и возмущённой поверхностью при прохождении звуковой волны); модель переноса излучения. В обеих моделях частицы предполагаются абсолютно чёрными, что даёт верхнюю оценку роли излучения, и намного большими средней длины волны электромагнитного излучения.

Получены дисперсионные соотношения в виде системы двух трансцендентных интегральных уравнений для действительной и мнимой частей комплексного волнового вектора $k(\omega) = (\omega/c(\omega))(1 + i\chi(\omega))$. Найдены асимптотические выражения для скорости звука $c(\omega)$ и коэффициента затухания на длину волны $\chi(\omega)$ в случае бесконечно больших и малых частот ω . Для произвольных ω и нескольких характерных функций распределения частиц по их радиусам (δ - и Γ -функций, логарифмически-нормального распределения и суперпозиции нормальных функций) получены численные решения дисперсионных уравнений. Показано, что для всех функций распределения частиц по их радиусам максимум $\chi(\omega)$ и точка перегиба кривой $c(\omega)$ смещаются в сторону меньших частот по сравнению со случаем монодисперсной взвеси.

Влияние теплового излучения сводится к тому, что с ростом температуры смеси в некоторой области частот скорость звука становится меньше равновесной и появляется локальный минимум затухания, причём качественный вид этих зависимостей одинаков для обеих рассмотренных моделей лучистого теплообмена между частицами. Этот «мгновенный» (со скоростью света) теплообмен между частицами возвращает нас к изотермической гипотезе Ньютона (дающей, как известно, заниженное значение скорости звука по сравнению с адиабатической гипотезой Лапласа).

Полученные решения дисперсионных уравнений позволяют рассчитать эффективную форму «линии Маха», образующейся при движении в неоднородной смеси точечного источника, если известен его амплитудно-частотный спектр, или тонкого тела, либо оценить характерный размер частиц по форме «линии Маха».

6. Оптика и электрофизика газодисперсного потока

Измерения интенсивности света, рассеянного частицами в сжатом слое, распределения плотностей потоков тепла и электрического тока по поверхности обтекаемого тела [61] содержат богатую информацию об «элементарных» процессах взаимодействия твёрдых частиц с телом. Однако для извлечения этой информации из экспериментальных данных необходимо решать обратные задачи, относящиеся, в принципе, к так называемым некорректно поставленным [62]. При этом в качестве необходимого элемента выступает прямая задача, которую можно использовать как для контроля результатов, так и выбора области параметров, в которой обеспечена единственность решения обратной задачи.

Заметим, что при обтекании тела полидисперсным потоком происходит разделение траекторий частиц разных размеров: «лёгкие» частицы уносятся вместе с газом, «тяжёлые» скапливаются у точки торможения на теле. В результате первоначальный массовый спектр частиц (который имел место в камере смешения или перед сжатым слоем) искажается, происходит обогащение тяжёлыми частицами в области вблизи оси потока и лёгкими — на периферии. Это явление особенно важно в экспериментах со струями, проводимых в аэродинамических трубах с их неизбежно ограниченными размерами, что вызывает необходимость исследовать всю предысторию динамики частиц перед обтекаемым телом. Эта пространственная эволюция массового спектра частиц сказывается и на интенсивности рассеиваемого ими зондирующего излучения. Поэтому для облегчения интерпретации результатов опыта экспериментаторы предпочитают выбирать частицы с наименьшим разбросом размеров (в пределе — монодисперсную взвесь).

В [63] на основе развитой ранее физико-математической модели газодисперсного потока численно найдено распределение газодинамических параметров в монодисперсной сверх-

звуковой струе, обтекающей преграду, и получены оптические характеристики рассеяния зондирующего излучения «лазерного ножа».

В [64] решена модельная задача отыскания оптимальных параметров (для класса задаваемых распределений концентрации монодисперсных частиц), обеспечивающих минимум невязки «теоретических» и «экспериментальных» значений интенсивности однократно рассеиваемого монохроматического излучения частицами, находящимися на всей трассе светового потока в предположении справедливости закона Бугера—Ламберта—Бэра.

При движении летательного аппарата в запылённой атмосфере Земли или других планет [65], полете в льдистых облаках [66] и в технологических процессах (например, при пескоструйной обработке поверхности твёрдых тел) может происходить электризация частиц и обтекаемого тела. В аэродинамических экспериментах с лёгкими (субмикронными) частицами металлов и их окислов также обнаруживается электрический ток через заземлённое проводящее тело, обтекаемое газодисперсным потоком [67, 68]. Таким образом, обработка и осмысливание результатов экспериментов с многофазными течениями сильно затруднено многопараметричностью исследуемых явлений: их зависимостью не только от геометрии аэрогазодинамической установки и параметров торможения, определяющих числа Маха и Рейнольдса в «чистой» газодинамике, но и от массового спектра частиц; плотностей, модулей упругости и пределов текучести материалов частиц и тела, находящихся в двухфазном потоке. Эти факторы значительно повышают роль математического моделирования и соответствующих численных кодов в сопровождении и планировании экспериментальных исследований.

В работе [69] предложена простая модель электризации частиц, ускоренных сверхзвуковой струёй и отражающихся от твёрдого тела, с учётом их вращения, силы Магнуса, взаимного влияния вращательного и поступательного движения частиц относительно несущего газа. Всем частицам после столкновения с телом приписывается одинаковый электрический заряд с учётом ограничения сверху локальным значением напряжённости электрического поля у поверхности частицы («мажорантная» модель). Проведены численные исследования струйных течений газа с частицами при наборе определяющих параметров, характерных для «типичного» аэродинамического эксперимента. Построены пространственные распределения электрического потенциала, поверхностное распределение плотности электрического тока и зависимость суммарного тока через проводящее заземлённое тело от радиуса и физических свойств материала частиц. Электрическим зарядом налетающих на тело частиц, их столкновениями с отражёнными частицами и силой Лоренца, действующей на последние, пренебрегается.

В работе [70] проведены численные исследования характеристик вязкой двухфазной струи в сверхзвуковом спутном потоке с учётом возможности гетерогенной конденсации или горения и влияния лучистого теплообмена. Перенос лучистой энергии с учётом многократного рассеяния рассмотрен на основе метода Монте-Карло и теории Ми для отдельной шаровой частицы. Обнаружено, в частности, что область конденсации может быть двухсвязной и состоять из приосевой и внешней кольцевой подобластей. Учёт окисления реактоспособного компонента струи в кислородсодержащем слое смешения (в рамках модели простой химически реагирующей системы) и нагревания за счёт теплоты реакции пассивных частиц может изменить лучистый поток на порядок своей величины.

В [71] аналитически и численно (методом Монте-Карло) исследовано пространственно-угловое распределение четырёх компонент вектора Стокса (плотности потока излучения, поляризации, эллиптичности и направления вращения электрического поля) для элементов выпуклого тела (сферических сегментов, конусов, цилиндров) с плоскими или осесимметричными полостью и двухфазной струёй. Несущий газ струи считается абсолютно прозрачным. «Элементарный» акт рассеяния излучения на отдельной шаровой частице описан в терминах 4×4 матрицы Мюллера. Отражение от стенок полости рассчитано согласно формулам Френеля. Показатели преломления материалов стенок и диспергированных частиц — комплексные числа. На простейших модельных задачах проиллюстрировано влияние на

вектор Стокса заданных поверхностного и объёмного распределений температур тела и струи, относительного содержания мелкодисперсной фазы в последней, а также колебаний её формы (крупных вихрей).

Развитые в данной работе алгоритмы могут служить теоретически-расчётной основой, например, для бесконтактной диагностики фазового состава газодисперсных струй и оптических свойств твёрдых неизотермических поверхностей.

7. Проблемы ракетного старта и входа в запылённую атмосферу

Соударение сверхзвуковой двухфазной струи с преградой является практически важной и физически интересной ситуацией. Примерами приложений здесь могут служить старт ракеты с палубы или стартового стола, расцепка блоков космического летательного аппарата, его вход в запылённую атмосферу, пескоструйная обработка поверхностей с целью изменения её свойств. С точки зрения физической гидродинамики — это пример принципиально неравновесного течения (по крайней мере, для налетающих частиц за ударной волной), в котором возникают потоки встречных (отражённых) частиц, огибающих их траекторий (каустик — областей повышенной концентрации), возможны столкновения частиц, их электризация, свечение.

В работах [72–76] рассмотрены некоторые из перечисленных аспектов осесимметричного и трёхмерного взаимодействия двухфазных струй с твёрдыми телами. В частности, в [75, 76] исследована закрутка струи как способ уменьшения плотности потоков массы, импульса и энергии на преграде.

8. К проблеме обледенения летательного аппарата

По крайней мере с середины 30-х годов прошлого века сохраняется устойчивый интерес к исследованиям обледенения и электризации самолётов. Тем не менее до настоящего времени эти важные (и взаимосвязанные) проблемы всепогодной гражданской авиации не решены полностью и остаются темой многочисленных теоретических и экспериментальных работ. Существующие расчётно-теоретические подходы основаны на сильно идеализированных физических моделях. Например, капли обычно считаются сферическими во всей области перед смачиваемыми поверхностями, а единственной действующей на них силой предполагается сила сопротивления. При этом обычно не учитываются особенности поведения капель в «пристеночном» слое, течение в котором может быть достаточно сложным вследствие искажения формы обтекаемой поверхности при нарастании льда.

В работах [77, 78] исследовано обтекание профиля крыла локально-монодисперсной взвесью в воздухе жидких переохлаждённых капель воды. Учтено влияние вязкого пограничного слоя на силу взаимодействия капель с несущим газом, а также влияние деформации самих капель на их траектории и в итоге на плотность распределения потока массы воды по обтекаемой поверхности и протяжённость «поверхности смачивания». Оценено воздействие электростатического поля крыла на динамику заряженных атмосферных капель. Изучено влияние управляющих параметров задачи: угла атаки крыла, радиуса невозмущённой шаровой капли, её электрического заряда. Обнаружен эффект немонотонной зависимости протяжённости смачиваемой поверхности от размера капель. Этот эффект проявляется только для «крупных» капель как следствие их деформации. (Это объясняет, почему проведённые ранее исследования других авторов для случая «мелких» капель давали правильные результаты.) Вследствие сильного уменьшения коэффициента захвата с ростом радиуса крупных капель обнаруженный эффект может заметно влиять на процесс обледенения, так как, несмотря на небольшое количество таких капель, масса каждой из них значительна.

Показана важная роль силы Сэффмана и электростатических сил (при наличии электрического поля у обтекаемого тела и зарядов у капель). Роль «пристеночной» силы, связанной с эффектом «мнимого изображения» капли, признана пренебрежимо малой.

Подчеркнём, что указанные эффекты тесно связаны с наличием вязкого пограничного слоя. Его игнорирование может привести к значительному расхождению численных и экспериментальных результатов, ранее обнаруженному зарубежными исследователями.

Наличие электростатического поля приводит к дополнительному «расслоению» траекторий частиц, несущих заряды противоположного знака, и, следовательно, может увеличить вероятность их столкновений между собой до попадания на обтекаемое тело.

В работе [79] предложена физико-математическая модель отвердевания метастабильной капли в потоке несжимаемого газа вокруг цилиндра с циркуляцией, имитирующего переднюю кромку крыла самолёта, движущегося в переохлаждённом облаке. Для определения поля скоростей несущей среды (воздуха) использованы выражения классической гидродинамики. На этом «фоне» исследуется динамика капли, определяющая интенсивность её «обдува» и отвода теплоты кристаллизации (на стадии отвердевания), и скорость охлаждения отвердевшей частицы. Приведены результаты численного исследования для характерного набора параметров. Возможные приложения — вынужденная кристаллизация капель переохлаждённого облака, предшествующая их соударению с поверхностью летательного аппарата (например, при помощи опережающего облучения ультразвуком), как средство борьбы с обледенением.

В работе [80] исследованы термические напряжения в наледи, вызванные распространением в ней теплоты фазового перехода, выделяющейся на поверхности слоя при отвердевании переохлаждённых капель. На основе тестовых исследований модельной задачи (для слоя льда в виде цилиндрического сегмента) показано, что локальные значения некоторых компонент тензора напряжений в наледи могут превосходить предел прочности льда (измеренный ранее в лабораторных условиях) и в конечном счёте приводить к сколу и срыву потоком вновь возникающих слоёв. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности решения самосогласованной задачи исследования одновременно проходящих процессов поверхностного обледенения и развития напряжений внутри образующегося слоя льда.

9. Пожаротушение с воздуха

К наиболее распространённым экологическим катастрофам относятся лесные пожары, приводящие к выгоранию больших лесных массивов и глобальному распространению продуктов сгорания. Авиация является самым эффективным средством борьбы с огнём, особенно в малонаселённых районах. Для выработки оптимальной стратегии сброса воды с самолёта необходима предварительная серьёзная теоретическая работа. Дело в том, что динамика сброшенной массы воды характеризуется большим набором пространственных и временных масштабов — от размеров микрокапли до десятков метров падающей массы жидкости, от времени испарения капель до времени падения тела с заданной высоты и, наконец, испарения массы, достигшей земли.

Далее, газ в восходящем потоке является многокомпонентным (смесь окислов углерода с азотом, паром воды, частицами сажи и т. д.); поэтому вычисления коэффициентов переноса (вязкости, диффузии и теплопроводности), определяющих динамику и теплообмен капель, должны проводиться по формулам для газовых смесей. Таким образом, в развитую нами систему уравнений гашения наземного пожара входит рассмотрение следующих проблем [81]: механика деформируемого объёма жидкости, сброшенной с самолёта в поле тяжести с учётом поверхностного уноса капель; газотермодинамика всплывающего термика с подсосом в него кислорода из окружающей среды и взаимодействия с падающей массой воды; описание окисления углеводородной массы в кислородсодержащей смеси газов и частиц (N_2 , O_2 , H_2O , C и др.).

В качестве целевой функции предложена максимизация отношения произведённого водяного пара (гасящего агента) к расходу сбрасываемой жидкости. Эта целевая функция является функционалом многих входных данных задачи (в частности, места сброса и падения объёма воды, интенсивности тепловыделения, предшествующей влажности, окисляющейся

массы, скорости ветра). Конечной целью является разработка бортового вычислительного алгоритма, позволяющего оптимизировать расход сбрасываемой жидкости в зависимости от непрерывно поступающей информации о наборе входных параметров.

На данном этапе исследований развита простая модель, описывающая каскадное разрушение сброшенного объёма жидкости в обыкновенных дифференциальных уравнениях [82].

10. Проблемы аэрофизического эксперимента

Высокоэнтальпийные аэродинамические установки, помимо достижения традиционной цели (создания высокоскоростного равномерного потока с однородным поперечным распределением параметров), могут использоваться в качестве устройств, ускоряющих микрочастицы для реализации современных технологических процессов (например, обработка поверхностей твёрдых тел). Разгон частиц до больших скоростей сопровождается падением плотности несущего газа и его глубоким охлаждением. В статье [83] построена физико-математическая модель двухфазного потока, учитывающая сильную температурную зависимость теплофизических свойств материала диспергированной фазы (коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости — согласно теории Дебая), а также возможность обтекания частиц при произвольных значениях числа Кнудсена (от континуального режима обтекания до свободномолекулярного). Приведены результаты численного исследования при значениях параметров, характерных для типичной высокоскоростной аэрогазодинамической установки и ускоряемых в ней диэлектрических микрочастиц.

В работе [84] численно исследовано влияние конденсирующихся паров воды на параметры высокоскоростного потока в газодинамической установке (отношение площадей выходного сечения ядра потока и критического сечения порядка тысячи). Учтено, что сильное охлаждение потока «отключает» поправку Томсона, оценивающую влияние кривизны поверхности капли на давление насыщенного пара над ней. Этот факт дал возможность упростить физическую модель процесса, в частности, использовать систему моментных уравнений Хилла. Получены функции распределения частиц конденсата по их радиусам. Показано, что даже при значительной начальной массовой доле пара ($\sim 10\%$) образуются нанокapли радиусом $\leq 10^{-8}$ м. Предполагается, что развитый подход справедлив вплоть до числа молекул ~ 20 (при меньшем значении уже нужно переходить к квантовомеханическому описанию).

В работе [85] предложена двухэтапная физико-математическая модель для исследования закрученного потока смеси «пассивных» газов, пара конденсирующегося компонента и его капель. На первом этапе спонтанная конденсация описывается в односкоростном приближении в рамках четырёхмоментной цепочки уравнений, влиянием пассивного несущего газа на этот процесс пренебрегается. На втором этапе полученные результаты служат в качестве граничных условий для исследования дальнейшей эволюции неоднофазного многоскоростного и многотемпературного потока. Формируются параметры полидисперсной смеси, состоящей из конечного числа фракций N , моменты которых совпадают с полученными ранее. Газотермодинамика смеси описывается $N + 1$ системами уравнений с учётом межфазного обмена массой, импульсом и энергией. Численные исследования проведены методом крупных частиц. Рассмотрены различные случаи задания радиальной зависимости окружной скорости на входе в канал переменного сечения. Обсуждаются эффекты полидисперсности и центробежной сепарации капель конденсата, которые можно использовать в газовой промышленности для разделения компонентов природных смесей.

В связи с предполагаемым развитием аэродинамических установок для реализации повышенных значений числа Рейнольдса (за счёт понижения температуры и повышения давления торможения) в [86] исследовано влияние используемого уравнения состояния пара на расчётные значения скорости испарения неподвижной капли того же вещества. Приведены примеры расчёта времени испарения азотных капель в газообразном азоте в области температур и давлений, характерных для обычных и криогенных аэродинамических труб. Дано сравнение результатов для уравнений состояния совершенного газа и пятипараметрическо-

го уравнения Битти—Бриджмена.

В [87] создан численный код для определения массового спектра частиц в потоке на основе измерения индикатрисы малоуглового рассеяния зондирующего излучения, который применим для анализа результатов экспериментов по исследованию сложных потоков вокруг обтекаемых тел [88].

11. Экология самолёта и аэропорта

Несмотря на то, что вся современная авиация поставляет всего порядка процента от загрязнений, выбрасываемых наземным транспортом, ещё во второй половине прошлого века были предприняты попытки оценить её возможное воздействие на верхнюю атмосферу, где концентрация озона достигает максимума и где должны летать перспективные сверхзвуковые гражданские самолёты. При этом наиболее опасными для защитного озонового слоя Земли были признаны окислы азота, выбрасываемые двигателями самолёта. В связи с этим в [89] предложена модель абсорбции окислов азота струи летательного аппарата каплями воды, образующейся в результате конденсации пара. Используются экспериментальные данные о комплексах, включающих постоянную закона Генри, коэффициенты диффузии и скорости химических реакций в жидкой фазе. Смесь остальных газов струи считается единым пассивным несущим газом. Капли воды растут как за счёт конденсации, описываемой интерполяционной формулой с асимптотикой для свободномолекулярного и континуального режимов обтекания, так и за счёт коагуляции, описываемой кинетическим уравнением с коэффициентом, зависящим от локальной скорости турбулентных пульсаций. Для численных оценок использована известная модель спутной изобарической струи с универсальным профилем эксцесса энтальпии, концентрации и средней скорости.

В работе [90] рассмотрен комплекс каналов воздействия самолёта на атмосферу: механическое перемешивание её слоёв; термическое — в результате конденсации паров; химическое — в результате выброса «чуждых» атмосфере молекул и радикалов; звуковой удар и «шум на местности» в районе интенсивно работающих аэродромов.

В работе [91] на основе моделей физико-химических процессов, развитых в предшествующих работах авторов и других исследователей [92,93], проведены численные исследования химического состава осесимметричной струи самолёта в условиях, близких ко взлётным. Дано сравнение случаев использования традиционного керосина и экологически более благоприятного авиационного сконденсированного топлива. Исследован перенос газообразных и аэрозольных выбросов двигателей самолётов над аэродромом и в окрестности аэропорта. Рассмотрены модельные задачи диффузии в турбулентной атмосфере первоначально осесимметричных струй и спутного вихря с учётом близости земли и бокового ветра. При этом химический состав струй и массовый спектр тяжёлых оседающих микрочастиц предполагаются сложившимися на более ранних стадиях процесса. Определены пространственно-временная эволюция концентраций компонентов следа и распределение плотности осевшего аэрозоля по поверхности земли.

Значительное внимание уделялось возможности использования рассеивающих свойств микрочастиц, образующихся в следе самолёта, для их визуализации с целью повышения вихревой безопасности, а также управлению прозрачностью контрейлов в районе аэропорта [94–105].

12. Двухфазные струи в разреженном пространстве

Для ориентации космических летательных аппаратов используются жидкостные реактивные двигатели малой тяги. Их своеобразие состоит в том, что они должны включаться до нескольких раз в секунду, причём на переходных режимах возникает большое количество капель непрореагировавших компонентов топлива, что зачастую приводило к сбою системы астронавигации (солнечный свет, рассеянный каплями, воспринимался в качестве звёзд).

В экспериментах, проведённых в вакуумных камерах с натурными горючим (несимметричный диметилгидразин) и окислителем (азотный тетраоксид) [106], было установлено, что вследствие большого различия давлений насыщения этих компонентов первыми выбрасываются из заклапанных полостей капли окислителя, запирая выход горючего, а затем — капли второго компонента. В [107], была построена теоретическая модель процесса и получено уравнение для пульсаций давления в камере сгорания, которое оказалось идентичным уравнению Рэлея—Плессета для радиальных пульсаций пузырька в безграничной жидкости. Это ещё одно подтверждение удивительной общности законов физики.

Численное исследование нестационарной парок капельной струи, истекающей в вакуум, проведено в [108].

Для исследования свойств двухфазных струй, истекающих в безграничное пространство, в [109] был предложен так называемый l - (c) -критерий, работоспособность которого была позднее подтверждена сравнением с экспериментальными результатами зарубежных исследователей [110]. В частности, он был использован для оценки воздействия управляющих струй «Союза» при стыковке с «Аполлоном» [111].

Работа [112], посвящённая динамике газопылевого сферически симметричного потока в голове кометы, предоставила случай применить этот критерий для оценки радиуса r_T границы перехода континуального течения в свободномолекулярное. Полученное в [113] на основе этого локального критерия значение r_T сильно отличается от предложенной в работе [112] оценки $r_T \sim l$. Между тем изменение свойств газового потока на космических масштабах может значительно повлиять на динамику ускоряемых им частиц [113, 114].

Этот же критерий использован при численном исследовании кинематики и термодинамики нано- и микрочастиц, истекающих из отверстия в вакуум, для оценки возможностей метода PIV (Particle Image Velocity) [115].

13. Заключение

Приведённый обзор свидетельствует о том, что за последний почти полувековой период на ФАЛТ МФТИ и в ЦАГИ сложилась самостоятельная научная школа физической газодинамики многофазных течений, усилия которой направлены на решение важных прикладных проблем летательной техники и авиационной экологии. В то же время достигнутые результаты, выявившие ряд интересных аспектов механики, оптики и электрофизики полидисперсных потоков и их взаимодействия с обтекаемыми телами, ставят необозримое множество новых вопросов в области физико-математического моделирования и численных исследований таких течений.

Автор выражает искреннюю благодарность всем своим соавторам, роль которых отражена в соответствующих библиографических ссылках.

Настоящий обзор и часть исследований выполнены при поддержке РФФИ (гранты 10-01-00745, 10-08-00820, 11-08-00603), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Государственный контракт 14.740.11.0576), а также в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (Проект №10.11).

Литература

1. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. — М.: Машиностроение, 1974.
2. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
3. *Салтанов Г.А.* Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и неоднородных сред. — М.: Наука, 1979.
4. *Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М.* Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. — Новосибирск: Наука, 1980.

5. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. — М.: Энергоиздат, 1981.
6. *Сенковенко С.А., Стасенко А.Л.* Релаксационные процессы в сверхзвуковых струях газа. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. *Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф.* Газовая динамика двухфазных течений в соплах. — Томск: Изд-во ТГУ, 1986.
8. *Гилинский М.М., Стасенко А.Л.* Сверхзвуковые газодисперсные струи. — М.: Машиностроение, 1990.
9. *Стернин Л.Е., Шрайбер А.А.* Многофазные течения газа с частицами. — М.: Машиностроение, 1994.
10. *Стасенко А.Л.* Физическая механика многофазных потоков. — М.: МФТИ, 2004.
11. *Millican R.F.* The general law of fall of a small spherical body through a gas, and its bearing upon the nature of molecular reflection from surfaces // *Phys. Rev.* — 1923. — V. 22. — P. 69–90.
12. *Basset A.B.* Treatise on hydrodynamics. — Cambridge: Deighton, Bell and Co., 1961 (1888).
13. *Henderson C.B.* Drag coefficient of particles in continuum and rarefied flows // *AAIA J.* — 1976. — V. 14, N 6 — P. 707–708.
14. *Стасенко А.Л.* К динамике двухфазной смеси совершенного газа с макроскопическими частицами // *Труды ЦАГИ.* — Вып. 1453. — 1973. — С. 3–30.
15. *Стасенко А.Л.* Модели динамики и тепломассообмена шаровых частиц в газодисперсных и парокпельных потоках // *Труды ЦАГИ.* — Вып. 2220. — 1984. — С. 24–46.
16. *Гринац Э.С., Стасенко А.Л.* Интерполяционная модель динамики и теплообмена шаровой частицы в несущем газе при произвольных значениях числа Кнудсена // *Труды ЦАГИ.* — Вып. 2676. — 2008.
17. *Гаркуша В.И., Стасенко А.Л.* Объёмная неизотермичность частиц в неоднородных потоках // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* — 1977. — № 2. — С. 134–143.
18. *Лукерченко Н.Н., Харламов А.А., Квурт Ю.П.* Экспериментальная оценка силы сопротивления, силы Магнуса и момента сопротивления, действующих на сферическую частицу // *Материалы VI Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2006).* — М.: Вузовская книга. — 2006. — С. 368.
19. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Обтекание твердого тела горячей сверхзвуковой газодисперсной струей с учетом вращения отраженных частиц // *Учёные записки ЦАГИ.* — 2011. — Т. XLII, № 2. — С. 53–67.
20. *Максимов З.М., Стасенко А.Л.* Механика и оптика вращающихся частиц и капель в газовых потоках // *Журн. прикл. механики и технич. физики.* — 1989. — № 5. — С. 103–110.
21. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. — М.: Мир, 1986.
22. *Стасенко А.Л., Шапшал И.Б.* Испарение капли в сильно перегретом паре // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* — 1983. — № 5. — С. 159–165.
23. *Мацнев Л.М., Рябинина Т.Н., Стасенко А.Л.* Испарение капли в «горячей» двухкомпонентной струе с учетом термодиффузии и перекрёстного эффекта // *Моделирование в механике.* Новосибирск: Изд-во ВЦ и ИТПМ СО АН СССР. — 1987. — Т. 1 (18), № 6. — С. 106–114
24. *Мацнев Л.А., Стасенко А.Л.* Испарение капли в сильно перегретой бинарной смеси // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* — 1987. — № 1. — С. 112–118.

25. Жохов В.А., Стасенко А.Л., Чеховский В.Ф. Динамика переохлаждённых капель в невозмущенном потоке и за скачком уплотнения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1981. — № 1. — С. 141–148.
26. Guryashkin L.P., Komissarova A.F., Stasenko A.L. Visualisation and dynamics investigation of free falling liquid nitrogen droplets // Digest: 18th Intern. Congress on High Speed Photography and Photonics. Xian.China. — 1988 — Ed. Xian Inst. Of Optics and Precision Mechanics. — 1988. — Т. 09–14. — Р. 234.
27. Гурьяшкин Л.П., Стасенко А.Л. Испарение и динамика капель азота в воздухе // Учёные записки ЦАГИ. — 1991. — Т. XXI, № 6. — С. 68–74.
28. Стасенко А.Л. Эвристическая модель отражения частицы от твердого тела: от адгезии до эрозии // Научно-технический отчет ФГУП ЦАГИ за 2006 г. — Жуковский: Изд-во ЦАГИ. — 2007. — С. 207–208.
29. Стасенко А.Л. Коэффициенты восстановления скорости частицы при отражении от поверхности твердого тела // Инж.-физический ж. — 2007. — Т. 80, № 5. — С. 38–44.
30. Tabakoff W., Hamed A. Dynamics and erosion study of solid particles in cascade // Trans. Inst. of Fluid — Flow Machinery. — Warszawa-Poznan. — 1976. — Р. 221 — 240.
31. Кангур Х.Ф., Клейс И.Р. Экспериментальное и расчетное определение коэффициента восстановления при ударе // Изв. АН СССР. МТТ. — 1988. — № 5. — С. 182–185.
32. Лашков В.А. Об экспериментальном определении коэффициентов восстановления скорости частиц потока газозвеси при ударе о поверхность // Инж.-физический ж. — 1991. — Т. 60, № 2. — С. 197–203.
33. Head W.J., CityplaceHarr StateM.E. The development of a model to predict the erosion of material by natural contaminant // Wear, Int. J. Sci. Technol. of Friction, Lubrication and Wear. — 1970. — V. 15, № 1. — Р. 1–40.
34. Brach R.M., Dunn P.F., Li X. Experiments and engineering models of microparticle impact and deposition // J. Adhesion. — 2000. — V. 74. — Р. 227–282.
35. Sommerfeld M., John W., Wang H., Goren S.L. Measurements of kinetic energy loss for particles impacting surfaces // Aerosol Sci. Technol. — 1990. — V. 12. — Р. 926–946.
36. Gilman J. Direct measurements of the surface energies of crystals // J. Appl. Physics. — 1960. — V. 31, N 12. — Р. 2208.
37. Петунин А.Н., Стасенко А.Л. Автоматическое устройство для измерения силы сцепления соприкасающихся нагретых твердых тел при низких давлениях // Ученые записки ЦАГИ. — 1973. — Т. IV, № 3. — С. 136–139.
38. Варажсин А.Л. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. — М.: Физматлит, 2008.
39. Стасенко А.Л. Упругость, текучесть, трение // Квант. — 2009. — № 3. — С. 48–50.
40. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Взаимодействие газодинамически ускоренных частиц с обтекаемым телом // Теплофиз. высоких температур. — 2009. — Т. 47, № 5. — С. 712–723.
41. Стасенко А.Л. Уравнения динамики неоднородной полидисперсной безстолкновительной смеси с учетом фазовых переходов // Труды ЦАГИ. — Вып. 2030. — 1980. — С. 27.
42. Стасенко А.Л., Цибаров В.А. Кинетика и гидродинамика многофазных систем // Модели механики неоднородных систем. — Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО АН СССР. — 1989. — С. 223–241.
43. Стасенко А.Л. Феноменология газодисперсных и парокпельных потоков с межфазным массообменом и лучистым энергопереносом // Труды ЦАГИ. — Вып. 2530. — 1994. — С. 3–27.

44. *Гиллинский М.М., Стасенко А.Л., Шуинов А.В.* Трехмерная газодисперсная струя с межфазными превращениями // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1987. — № 3. — С. 36–41.
45. *Стасенко А.Л., Шатшал И.Б.* Спонтанная конденсация пара в неравновесном сверхзвуковом монодисперсном потоке // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1984. — № 4. — С. 138–146.
46. *Благосклонов В.И., Стасенко А.Л.* Двумерные сверхзвуковые течения смеси пара и капель в сопле и затопленной струе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1978. — № 1. — С. 137–148.
47. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Взаимодействие двухфазной струи с наклонной преградой // Учёные записки ЦАГИ. — 1999. — Т. XXX, № 1–2. — С. 124–130.
48. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Трёхмерное взаимодействие с преградами сверхзвуковой газокапельной струи с учётом фазовых переходов // Теплофиз. высоких температур. — 2003. — Т. 41, № 6. — С. 914–910.
49. *Гиллинский М.М., Стасенко А.Л., Шуинов А.В.* Трёхмерное сверхзвуковое течение газа с испаряющимися частицами // Учёные записки ЦАГИ. — 1986. — Т. XXII, № 2. — С. 9–17.
50. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Закрученный поток конденсирующейся газовой смеси в сопле Лавалья // Математич. моделирование. — 2004. — Т. 16, № 1. — С. 12–22.
51. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Динамика и теплообмен диэлектрических микрочастиц в высокоэнтальпийной газодинамической установке // Труды ЦАГИ. — Вып. 2676. — 2008. — С. 15–24.
52. *Маликов З.М., Стасенко А.Л.* Механика и оптика полидисперсной струи с вращающимися частицами // Учёные записки ЦАГИ. — 1996. — Т. XXVII, № 1–2. — С. 117–123.
53. *Гиллинский М.М., Стасенко А.Л., Толстов В.Н.* Численное исследование осесимметричной двухфазной струи с учётом догорания частиц в спутном потоке // Сверхзвуковые газовые струи. — Новосибирск: Наука, 1987. — С. 72–78.
54. *Деревич И.* Столкновения частиц в турбулентном потоке // Изв. РАН. МЖГ. — 1996. — № 2. — С. 104–116.
55. *Зайчик Л.И.* Оценка времени между столкновениями дисперсных частиц в турбулентном потоке // Теплофиз. высоких температур. — 1998. — Т. 36, № 3. — С. 456–460.
56. *Ким О.В., Стасенко А.Л.* Кинетика капель в турбулентном потоке // Математич. моделирование. — 2005. — Т. 17, № 11. — С. 103–117.
57. *Гинзбург В.Л.* Об общей связи между поглощением и дисперсией звуковых волн // Акустич. ж. — 1955. — Т. 1, № 1. — С. 31–39.
58. *Немков Р.Г.* Линейно-акустический метод определения времени релаксации по форме эффективной линии Маха // Акустич. ж. — 1969. — Т. 15, № 1. — С. 112–115.
59. *Стасенко А.Л.* К дисперсии звука в смеси газа с теплоизлучающими макроскопическими частицами // Акустич. ж. — 1972. — Т. XIX, № 6. — С. 891–896.
60. *Стасенко А.Л., Чегис И.Л.* Распространение малых возмущений в смеси газа с теплоизлучающими макроскопическими частицами, различными по размерам // Учёные записки ЦАГИ. — 1974. — Т. V, № 4. — С. 29–39.
61. *Василевский Э.Б., Осипцов А.Н., Чирихин А.В., Яковлева Л.В.* Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела в высокоскоростном потоке, содержащем мелкодисперсные частицы // Инж. Физический ж. — 2001. — Т. 74, № 6. — С. 34–42.
62. *Тихонов А.Р., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. — М.: Наука. — 1979.

63. *Миллер А.Б., Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Механика и оптика сверхзвукового мелкодисперсного потока около освещаемой сферы // Учёные записки ЦАГИ. — 2007. — Т. XXXVIII, № 3–4. — С. 92–101.
64. *Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л.* Решение нелинейного уравнения Фредгольма первого рода в применении к оптике многофазных потоков // Труды XV международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики». — Изд-во Харьковского университета. — 2011. — С. 35–38.
65. *Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л.* Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. — М.: Изд-во «Янус-К», 2007.
66. *Кашеваров А.В., Стасенко А.Л.* Вынужденная кристаллизация капель перед телом, движущимся в переохлаждённом облаке // Математическое моделирование. — 2010. — Т. 22, № 2. — С.139–147.
67. *Курячий А.П.* Особенности электризации металлического тела, движущегося с большой скоростью в аэрозольной среде // Учёные записки ЦАГИ. — 1983. — Т. XIV, № 1. — С. 48–56.
68. *Vasilevskii Ed., Gorelov V., Kazansky R., Yakovleva L.* Body electrification in a supersonic two-phase flow // Proc. of the second Intern. Conf. «Materials and Coating for Extreme Performances: Investigations, Applications, Ecologically Safe Technologies for Their Production and Utilization». 16–20 Sept. Katseveli, Crimea. — 2002. — P. 23–24.
69. *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.
70. *Дынкикова Г.Я., Стасенко Г.Я.* Газодинамика неоднородной вязкой спутной струи с учётом фазовых и химических превращений и лучистого энергопереноса // Труды ЦАГИ. — Вып. 2479. — 1993. — С. 39–57.
71. *Дынкикова Г.Я., Стасенко А.Л.* Математическое моделирование вектора Стокса выпуклых осесимметричных тел и двухфазных струй // Труды ЦАГИ. — Вып. 2470. — 1993. — С. 3–26.
72. *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. — V. 31. — P. 1244–1275.
73. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Особенности обтекания затупленного тела сверхзвуковой полидисперсной струей с закруткой отраженных частиц // Теплофиз. высоких температур. — 2010. — Т. 49, № 1. — С. 73–80.
74. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Газодинамика двухфазной струи, натекающей на нормальную преграду // Учёные записки ЦАГИ. — 1990. — Т. XXI, № 5. — С. 51–58.
75. *Моллесон Г.В., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л.* Газодинамические и оптические характеристики закрученного двухфазного потока в сопле и струе, натекающей на нормальную преграду // Моделирование в механике. Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО АН СССР. — 1987. — Т. 1 (18), № 6. — С. 121–127.
76. *Давыдов Ю.М., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л.* Закрученное течение газа с дробящимися каплями в сопле и перпендикулярной к преграде струе // Учёные записки ЦАГИ. — 1987. — Т. XVIII, № 6. — С. 31–39.
77. *Стасенко А.Л., Толстых А.И., Ширококов Д.А.* К моделированию оледенения самолёта: динамика капель и поверхность смачивания // Математич. моделирование. — 2001. — Т. 13, № 6. — С. 81–86.

78. Стасенко А.Л., Толстых А.И., Ширококов Д.А. Динамика деформируемых капель у поверхности крыла в вязком воздухе // Изв. РАН. МЖГ. — 2002. — № 45. — С. 180–190.
79. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Вынужденная кристаллизация капель перед телом, движущимся в переохлаждённом облаке // Математич. моделирование. — 2010. — Т. 22, № 2. — С. 139–147.
80. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Моделирование полей температуры и напряжений в слое льда на цилиндре в переохлаждённом газокпельном потоке // Математич. моделирование. — 2010. — Т. 22, № 10. — С. 119–126.
81. Вышинский В.В., Кудров М.А., Стасенко А.Л. Динамика и разрушение макрообъёма жидкости, сброшенной с ЛА // Труды XIV Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики». Изд-во Харьковского университета. — 2009. — С. 50–53.
82. Вышинский В.В., Кудров М.А., Стасенко А.Л. Над пожаром — самолёт // Квант. — 2010. — № 6. — С. 2–4.
83. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Ускорение микрочастиц в газодинамической установке с большим расширением потока // Теплофиз. Высоких температур. — 2008. — Т. 46, № 1. — С. 110–118.
84. Гринац Э.С., Стасенко А.Л. Квазиклассические оценки влияния конденсации воды на параметры потока в сверхзвуковом сопле с большим расширением // Учёные записки ЦАГИ. — 2008. — Т. XXXIX, № 1–2. — С. 99–107.
85. Моллесон Г.В., Стасенко А.Л. Осесимметричное течение смеси реальных газов с конденсирующимся компонентом // Теплофиз. высоких температур. — 2005. — Т. 43, № 3. — С. 422–430.
86. Карпова Г.А., Стасенко А.Л. Влияние реальных свойств несущего пара на время испарения капли // Учёные записки ЦАГИ. — 1982. — Т. XIII, № 6. — С. 101–105.
87. Рудаков В.П., Стасенко А.Л., Флакман Я.Ф. Определение массового спектра частиц в газодинамических потоках методом малоуглового рассеяния // Учёные записки ЦАГИ. — 1993. — № 2. — С. 114–122.
88. Василевский Э.Б., Осипцов А.Н., Чирихин А.В., Яковлева Л.В. Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела в высокоскоростном потоке, содержащем малоинерционные частицы // Инж.-физический ж. — 2001. — Т. 74, № 6. — С. 34–42.
89. Стасенко А.Л. К теории хемосорбции окислов азота каплями воды в струе стратосферного самолёта: препринт / ЦАГИ № 51. — 1991. — 52 с.
90. Стасенко А.Л. Проблемы авиационной экологии // Энергия. — 1999. — № 7. — С. 21–24.
91. Кашеваров А.В., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Влияние вида горючего на физико-химические свойства струй самолётов и распространение их компонентов в окрестности аэропорта // Учёные записки ЦАГИ. — 2001. — Т. XXXII, № 3–4. — С. 165–175.
92. Klopovsky K.S., Mankelevich Yu.S., Popov A.M., Popov M.A., Popovicheva O.B., Rakhimov A.T., Rakchimova T.V.-D xonal average model for the polar ozone depletion problem // Preprints of the Institute of Nuclear Physics (НИИ ЯФ МГУ). — 1994. — № 94–32/354; № 94–33/355.
93. Schuman U. On the effect of emission from aircraft engines on the state of the atmosphere // Ann. Geophys. — 1994. — V. 12. — P. 365–384.
94. Кашеваров А.В., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Осесимметричная спутная струя с физико-химическими процессами // Учёные записки ЦАГИ. — 1998. — Т. XXIX, № 3–4. — С. 123–133.

95. *Вьшинский В.В., Стасенко А.Л.* Физические модели, численные и экспериментальные исследования аспектов авиационной экологии и безопасности полётов // Труды МФТИ. — 2009. — Т. 1, № 3. — С. 23–39.
96. *Кашеваров А.В., Стасенко А.Л.* Управление массовым составом и прозрачностью контррейла авиалайнера при помощи инъекции ионов в струи двигателей // Учёные записки ЦАГИ. — 2006. — Т. XXXVII, № 4. — С. 20–29.
97. *Миллер А.Б., Стасенко А.Л.* Оптические характеристики аэрозольного следа самолёта в запылённой атмосфере // Учёные записки ЦАГИ. — 2002. — Т. XXXIII, № 1–2. — С. 91–99.
98. *Вьшинский В.В., Стасенко А.Л.* Струйно-вихревой след самолёта: проблемы экологии и безопасности полёта // Математическое моделирование. — 1999. — Т. 11, № 4. — С. 100–116.
99. *Деревич И.В., Здор А.Г., Стасенко А.Л.* Кинетическая модель и численные исследования кинетики облачных капель в следе самолёта // VI Минский международный форум по тепло — и массообмену. — 19–23 мая 2008. — Изд-во ИТМО. — 2008. — Тезисы докл. — С. 36–37.
100. *Ким О.В., Миллер А.Б., Стасенко А.Л.* Кинетика заряженных капель в спутном следе самолёта // Математич. моделирование. — 2003. — Т. 15, № 6. — С. 83–88.
101. *Stasenko A.L.* High-altitude civil aviation impact on the ozone layer: theory and flight experiments planned // Second Annual Meeting HSRP/AESA. Virginia Beach. USA. May 17–22, 1992. — P. 57.
102. *Кашеваров А.В., Коган М.Н., Кучеров А.Н., Стасенко А.Л.* Создание канала просветления лазерным пучком в конденсационной струе высотного самолёта // Оптика атмосферы и океана. — 1997. — Т. 10, № 12. — С. 1568–1577.
103. *Grinats E.S., Kashevarov A.V., Stasenko A.L.* Gasdynamics, optics, and physical chemistry of an aircraft condensable wake // Proc. Intern. Colloquium “Impact of Aircraft Emissions upon the Atmosphere”. — 15–18 October, 1996. Paris. Comite’ Avion-Ozone. ONERA/AEREA. — V. II. — P. 473–475.
104. *Stasenko A.L., Grinats E.S., Kashevarov A.V.* Gasdynamics and optics of an aircraft condensable wake // 1996 World Aviation Congress, Los Angeles (CA), USA.
105. *Вьшинский В.В., Стасенко А.Л.* Моделирование струйно-вихревого следа тяжёлого самолёта над аэропортом // Математич. моделирование. — 2003. — Т. 15, № 11. — С. 69–90.
106. *Карпов А.А., Стасенко А.Л.* Nonequilibrium wave processes in boiling liquid of complex composition // 20th Intern. Symp. on Shock Waves (ISSW). Calif. Inst. of Technology, Pasadena, July 23–28. — Paper 067. — 1995.
107. *Карпова Т.А., Стасенко А.Л.* Релаксационные колебания давления в полужамкнутом объеме и полости с конечным запасом испаряющейся жидкости // Прикл. задачи теории переноса. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР. — 1981. — С. 75–83.
108. *Маликов З.М., Стасенко А.Л.* Нестационарная парокпельная струя в разреженном пространстве // Учёные записки ЦАГИ. — 1993. — Т. XXIV, № 3. — С. 121–132.
109. *Стасенко А.Л.* Критерий для определения «границы» сплошного течения в свободно расширяющейся струе // Инж.-физический ж. — 1969. — Т. 16, № 1. — С. 9–14.
110. *Стасенко А.Л.* Замораживание трансляционных степеней свободы молекул в неоднородных потоках // Молекулярная газодинамика. — М.: Наука, 1982. — С. 181–184.
111. *Антохин В.М., Жохов В.А., Стасенко А.Л. и др.* Исследование на модели обтекания космического корабля «Союз» реактивными струями управляющих двигателей корабля «Аполлон» // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1977. — № 3. — С. 124–133.

112. *Probstein R.F.* The dusty gasdynamics of comet heads // Проблемы газодинамики и механики сплошной среды. (К шестидесятилетию академика Л.И. Седова.) — М.: Наука, 1969. — С. 397–409.
113. *Стасенко А.Л.* К вопросу об истечении газов с твёрдыми частицами в пустоту // Инж.-физический ж. — 1972. — Т. 22, № 3. — С. 511–513.
114. *Моллесон Г.В., Стасенко А.Л.* Ускорение нано- и микрочастиц свободно расширяющейся струёй газа // Механика и наномеханика структурно сложных и гетерогенных сред. (К 95-летию со дня рождения академика В.В. Струминского.) — М.: Альянс-трансатом. — 2010. — Т. II. — С. 137–150.
115. *Стасенко А.Л.* Столкновения, рассеяние и небесные явления // Квант. — 2011. — № 3. — С. 32–34.

Поступила в редакцию 25.08.2011