На правах рукописи

Зарипов Шамиль Хузеевич

Моделирование течений аэрозоля в задачах аспирации и инерционной сепарации

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Казань – 2004

Работа выполнена на кафедре моделирования экологических систем экологического факультета и в отделе газовой динамики Научно-исследовательского института математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Владимир Павлович Житников,
доктор физико-математических наук, профессор Лев Семенович Ивлев,
доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ и РТ Аркадий Васильевич Кузнецов

Ведущая организация: Институт механики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

Защита состоится 28 октября 2004 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Казанского государственного университета.

Автореферат разослан “____” _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, доцент А.А. Саченков

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена развитию теории пробоотбора и инерционной сепарации аэрозольных частиц. В рамках моделей невязкого и вязкого течений несжимаемой жидкости решены ряд актуальных задач аспирации и сепарации аэрозольных частиц. В каждой из них предлагаются либо новая постановка задачи, либо новый метод решения.

Актуальность темы. Аэрозоли в настоящее время являются объектом растущего внимания специалистов из различных областей (механики, химии, медицины и т.д.). Все это обусловлено той ролью, которую аэрозоли играют в повседневной жизни человека. Аэрозоли в виде загрязненной воздушной среды (запыленный воздух в производственных помещениях, промышленные выбросы в атмосфере) могут отрицательно влиять на здоровье человека или наоборот могут быть использованы как лечебное средство (процедуры ингаляции). Изучение реальных аэрозолей базируется на измерении концентраций и дисперсности аэрозольных частиц. В связи с этим в настоящее время интенсивно развиваются как прямые (основанные на непосредственном отборе проб аэрозоля), так и косвенные (оптические) методы исследования воздушной среды, а также совершенствуются существующие методы очистки воздуха от аэрозольных загрязнений. При этом обеспечение адекватной интерпретации полученных результатов требует понимания основных физических эффектов, сопровождающих процесс измерения. В связи со сложностью процессов, возникающих при аэрозольных измерениях и очистке газов от частиц, такое понимание может быть получено только на основе математического моделирования с использованием современных физических и математических моделей.

Прямые методы исследования аэрозолей предполагают отбор аэрозольных частиц в измерительное устройство. В реальных неизокинетических условиях пробоотбора из движущейся среды концентрация частиц внутри прибора может отличаться от концентрации частиц в изучаемом аэрозоле. Для количественной оценки и коррекции искажений, вносимых пробоотборником в измерения концентраций аэрозоля, вводится понятие коэффициента аспирации A, представляющего

собой отношение средней концентрации в измерительном устройстве к счетной концентрации частиц в невозмущенной среде. Коэффициент аспирации может определяться как экспериментально, так и теоретически. Определение коэффициента аспирации для заданного способа отбора проб является задачей, имеющей большое практическое значение, и представляет собой основную задачу теории пробоотбора аэрозольных частиц. В общем случае *A* зависит от характеристик самой частицы (размер, плотность, форма), свойств газового потока, геометрии пробоотборника (размер, форма), ориентации пробоотборника относительно направления ветра и направления силы тяжести. Несмотря на давнюю историю исследований аспирации аэрозоля, остаются неисследованными или мало исследованными ряд важных задач теории пробоотбора: аспирация из движущегося воздуха в расширенном диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации (аспирация из низкоскоростной и высокоскоростной среды), аспирация из неподвижной среды в тупоголовые пробоотборники, влияние силы тяжести на коэффициент аспирации. Частично восполнить имеющиеся пробелы, и призвана настоящая работа.

Цель и задачи исследований. Целью работы является решение новых актуальных задач аспирации аэрозоля и инерционной сепарации, разработка эффективных численных и аналитических моделей, параметрические исследования и анализ физических эффектов для рассматриваемых процессов.

Теоретическое значение и научная новизна работы определяются следующим:

- предложен метод расчета траекторий аэрозольных частиц, основанный на преобразовании уравнений движения частиц к переменным в плоскости годографа скорости или в параметрической плоскости, для плоских и осесимметричных задач о течении аэрозоля;
- решены задачи об аспирации аэрозоля из движущегося и неподвижного газа в щелевой и цилиндрический пробоотборники в

рамках моделей безотрывного и отрывного потенциального течения несжимаемой жидкости;

- решены задачи об аспирации аэрозоля в круглую тонкостенную трубку из неподвижной среды и в трубку, расположенную на цилиндрическом теле, из движущегося газа;
- предложен метод расчета предельных траекторий в задачах об аспирации и захвате аэрозольных частиц, основанный на постановке краевой задачи для уравнений движения частиц, исследован коэффициент захвата аэрозольных частиц сферой в потенциальном потоке газа при учете влияния силы тяжести;
- развита модель аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник из неподвижного воздуха, проведен численный анализ особых точек уравнений движения частиц и получен критерий их появления в области решения, показана связь между положением особых точек и явлением подсоса воздуха без частиц, исследован коэффициент аспирации при различной ориентации и варьировании числа Стокса и скорости седиментации;
- решена задача о течении запыленного газового потока в коническом инерционном воздухоочистителе и получена формула для коэффициента пропуска;
- развита математическая модель течения аэрозоля в плоском импакторе с прямоугольным углублением на поверхности импакции и исследовано влияние размеров углубления на эффективность осаждения частиц;
- решена задача о течении запыленного газа в плоском канале с вертикальным экраном и исследована эффективность осаждения частиц при совместном действии инерционных и гравитационных сил;
- развита математическая модель движения и исследована динамика растущей аэрозольной частицы в термодиффузионной камере, получена формула для высоты подъема капли;
- решена задача о нестационарном движении капли в линейной цепочке с учетом гидродинамического взаимодействия.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются применением строгих математических моделей и методов при построении аналитических и численных решений, удовлетворительным согласием полученных результатов с результатами других авторов, в том числе, с имеющимися экспериментальными данными.

Практическая значимость. Решение всех описанных задач и полученные результаты расширяют понимание основных закономерностей при пробоотборе аэрозольных частиц в новых мало исследованных условиях. Предложенные методы и полученные формулы способствуют эффективному анализу реальных аэрозольных измерительных устройств и систем воздухоочистки. Часть результатов была включена в отчет по хоздоговорной работе с ВНИИОФИ (1991-1992). Развитые модели и результаты исследований могут быть рекомендованы для использования природоохранными организациями, занимающимися анализом и профилактикой дисперсных воздушных загрязнений. Полученные результаты используются в учебном процессе при чтени спецкурсов по основам механики аэрозолей на механико-математическом и экологическом факультетах Казанского госуниверситета.

Апробация работы. Основные результаты диссертации по мере получения докладывались на следующих конференциях и семинарах: IUTAM Symposium, Liquid-Particles Interactions in Suspensions Flows, (Grenoble-France, 18-22 Apr, 1994); Европейские аэрозольные конференции EAC’1996 (Делфт, Нидерланды), EAC’1999 (Прага, Республика Чехия), EAC’2001 (Лейпциг, Германия), EAC’2003 (Мадрид, Испания); 6 Международная аэрозольная конференция IAC’2002 (Taipei, Taiwan); VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 23-29 августа, 2001 г.); International Aerosol Symposium - IAS-2, IAS-3 (Москва, 1995,1996), IAS-4 (Санкт–Петербург, 1998); 17th German CADFEM meeting, (Sonthofen, Germany, 1999); International Aerosol Conference dedicated to Memory of prof. A.Sutugin (Moscow, Russia, 26 th - 30th of June 2000); семинары в Институте аэродинамики технического университета в Штутгарте (Штутгарт, 7 сентября 2001 г.) и в Институте химических процессов Академии наук Республики Чехия (Прага, 26 июня 2002 г.); 2-я и 4-я - Республиканские конференции "Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан" (Казань, 1995, 2000); 1-st international conference on “Nonequilibrium processes in nozzles and jets”(Moscow, Russia, 1995); 1-я Международная конференция

"Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизированное проектирование в авиа и машиностроении" (21-27 сентября 1997г., Казань); научно-практический семинар “Современные компьютерные программы численного моделирования в научных исследованиях и инженерных разработках”, (Казань, 22-23 мая 2000); 12-й Мезвузовский научно-технический семинар “Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология”, (Казань, 17-18 мая 2000 г.); конференция “Актуальные проблемы математики и механики”, посвященная 40-летию механико-математического факультета Казанского госуниверситета (Казань, октябрь 2000г); научно - методический семинар “Проблемы использования CAE технологий инженерного анализа в промышленности и в учебном процессе” (Москва, 19-21 октября 2000 г.); международная конференция, посвященная 90-летию со дня Г.Г.Тумашева “Краевые задачи аэрогидромеханики и их приложения” (Казань, 21-24 ноября 2000г.); V Казанская международная летняя конференция “Теория функций, ее приложения и смежные вопросы”, (Казань, 27 июня - 4 июля 2001г.); XIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция “Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология” (Казань, 15-17 мая 2001 г.); XVI сессия Междунар. Школы по моделям механики сплошной среды (27 июня –3 июля 2002 г., Казань); VI Международная конференция “Естественные и антропогенные аэрозоли” (Санкт–Петербург, 5–9 октября 2003г.), итоговая научная конференция 2003г. Казанского научного центра Российской академии наук, итоговые научные конференции Казанского госуниверситета и семинары НИИММ им. Н.Г. Чеботарева (1992-2004 г.г.), семинар по аэромеханике акад. Г.Г. Черного в Институте механики Московского госуниверситета (17 марта 2004).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в статьях [1-18], тезисах и аннотациях [19-25]. В совместных публикациях автору диссертации принадлежат постановки задач или участие в постановке задач и личное участие на всех этапах получения и анализа результатов. Численные расчеты в работе [3] выполнены Арасланoвым Ш.Ф. под руководством автора диссертации. Автор выражает глубокую благодарность всем своим соавторам.

Объем и структура диссертации. Диссертация объемом 230 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 229 наименований. Главы диссертации разбиты на двенадцать параграфов. Формулы, рисунки и таблицы нумеруются с указанием номера параграфа и порядкового номера в пределах параграфа. Общее число рисунков – 90.

Результаты, представленные в диссертации, поддержаны в рамках выполнения грантов: РФФИ (N99-01-00-169, N02-01-00836); РФФИ и Европейского аэрозольного общества на участие в Европейских аэрозольных конференциях (1996, 1999, 2001, 2003); фонда НИОКР РТ (гранты АНТ по фундаментальным исследованиям по отделениям экологии и математики, механики и машиностроения, 1997, 1999-2000, 2002-2004); Чешской академии наук (N104/97/1198, 1999); для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов высших учебных заведений Минобразования России (А03-2.10-613, 2003). Автор выражает благодарность упомянутым фондам и организациям за финансовую поддержку, которая способствовала выполнению работы.

Основное содержание работы

Во введении дается общая постановка задачи аспирации аэрозоля. Приводится обзор теоретических и экспериментальных исследований коэффициента аспирации для различных типов пробоотборников и условий пробоотбора. Значительный вклад в исследование задачи аспирации аэрозолей внесли Л.М. Левин, С.П. Беляев, В.Т. Кустов, В.М. Волощук, А.Г. Сутугин, С.А. Гриншпун, Г.Н. Липатов, А.А. Медведев, C.N. Davies, J.H. Vincent, S. Dunnett, D.B. Ingham, X. Wen, K. Willeke и др.

Методологическую и теоретическую основу моделей и методов, применяемых в диссертации, составили научные труды Н.А. Фукса, Р.И. Нигматуллина, С. Соу, Л.М. Левина, В.М. Волощука, J.H. Vincent, Л.С. Ивлева, С.П. Баканова, А.Н. Осипцова, П. Райста, Ю.И. Яламова и др. Традиционная механика аэрозолей характеризуется пренебрежением обратного влияния частиц на газовую среду, что оправдано для большинства случаев реальных аэрозолей в связи с невысокими концентрациями частиц в них. Кроме того, обычно пренебрегается силами взаимодействия между частицами. Способ описания газовой среды вокруг аэрозольной частицы зависит от безразмерного параметра числа Кнудсена $Kn = \lambda_i / \delta$, представляющего собой отношение длины свободного пробега молекулы газа λ_i к размеру частицы δ. Рассматриваемые в работе задачи относятся к случаю $Kn << 1$, когда размеры частиц много больше длины свободного пробега молекулы газа, течение несущей среды вокруг частицы рассматривается в приближении гидродинамики сплошной среды. В рамках принятых допущений моделирование течений аэрозоля сводится, во–первых, к определению поля скоростей несущей среды и, во–вторых, к

расчету траекторий аэрозольных частиц в найденном поле скоростей. Для характерных скоростей течений аэрозоля, возникающих в измерительных устройствах и инерционных воздухоочистителях, несущая среда часто с высокой точностью может быть описана в рамках теории течений несжимаемой жидкости.

Уравнение движения одиночной сферической частицы с постоянной массой в газовом потоке, выражающее второй закон Ньютона, может быть записано в форме

$$m_p \frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{1}{8} c_d \pi \mu \delta^2 (\bar{V} - \bar{U}) \left| \bar{V} - \bar{U} \right| - 0.5 m_g \frac{d(\bar{V} - \bar{U})}{dt}$$
$$- \frac{3}{2} \delta^2 \sqrt{\pi \mu \rho} \int_0^t \left(\frac{d\bar{V}}{dp} - \frac{d\bar{U}}{dp} \right) \frac{dp}{\sqrt{t-p}} + (m_p - m_g)\bar{g} \qquad (1)$$

где m_p – масса частицы, c_d – коэффициент сопротивления частицы, m_g – масса газа с объемом равным объему частицы, δ – диаметр частицы, ρ – плотность газа, μ коэффициент динамической вязкости газа, $\bar{V}$ и $\bar{U}$ – скорости частицы и газа, соответственно, $\bar{g} = g\bar{G}$, g – ускорение свободного падения, $\bar{G}$ – единичный вектор в направлении силы тяжести. Первый член в правой части уравнения (1) представляет собой сопротивление газовой среды, второй учитывает силу, связанную с ускорением жидкости вокруг частицы и называемую силой присоединенных масс. Ввиду малой плотности газовой среды по сравнению с плотностью частиц в аэрозольных течениях силой присоединенных масс можно пренебречь. Интегральный член представляет собой силу Бассе, учитывающую нестационарность пограничного слоя вокруг движущейся капли. Используя время релаксации $\tau = \rho\delta^2 / 18\mu$, характерные скорость U_0 и длину L, можно построить безразмерный параметр – число Стокса St, характеризующий отношение инерционных сил к вязким $St = \tau U_0 / L$. Число Рейнольдса частицы задается формулой $\mathrm{Re}_p = \delta\rho \left| \bar{V} - \bar{U} \right| / \mu$.

В конце введения приводятся **основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод расчета траекторий аэрозольных частиц, основанный на преобразовании уравнений движения частиц к переменным в плоскости годографа скорости или в параметрической плоскости, для плоских и осесимметричных задач о течении аэрозоля.

2. Модели аспирации аэрозоля из движущегося и неподвижного газа в щелевой и цилиндрический пробоотборники в приближении безотрывного и отрывного потенциального течения несжимаемой жидкости. Результаты параметрических исследований.

3. Результаты параметрических исследований задачи об аспирации аэрозоля в круглую тонкостенную трубку из неподвижной среды и в трубку, расположенную на цилиндрическом теле, из движущегося газа.

4. Метод расчета предельных траекторий в задачах механики аэрозолей с помощью краевой задачи для уравнений движения частиц. Результаты параметрических исследований коэффициента захвата аэрозольных частиц сферой в потенциальном потоке газа при учете влияния силы тяжести.

5. Математическая модель аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник из неподвижного воздуха. Результаты исследования особых точек уравнений движения частиц в окрестности пробоотборника. Результаты параметрических расчетов коэффициента аспирации при различной ориентации и варьировании числа Стокса и скорости седиментации.

6. Постановка и решение задачи о течении запыленного газового потока в коническом инерционном воздухоочистителе. Результаты параметрических исследований. Приближенная формула для коэффициента пропуска пыли.

7. Модель течения аэрозоля в плоском импакторе с прямоугольным углублением на поверхности импакции. Результаты параметрических исследований.

8. Результаты решения задачи о течения запыленного газа в плоском канале с вертикальным экраном.

9. Математическая модель движения растущей аэрозольной частицы в термодиффузионной камере. Результаты расчетов и формула для высоты подъема капли.

10. Результаты исследования задачи о движении капли в линейной цепочке капель с учетом гидродинамического взаимодействия.

В первой главе рассмотрены плоские задачи аспирации аэрозоля для случая щелевого и цилиндрического пробоотборников в рамках модели потенциального течения несжимаемой жидкости. Удобство использования плоских моделей потенциального течения несжимаемой жидкости состоит в возможности получения аналитического решения задачи с помощью методов теории функций комплексного переменного. Вместе с тем, аналитическое представление поля скоростей обычно не содержит в явном виде зависимость от координат. Поэтому при интегрировании уравнений движения частиц, в правых частях которых появляются компоненты скорости несущей среды, в произвольной точке траектории частицы нужно решать трансцендентное уравнение, дающее связь координат физической плоскости и координат параметрической плоскости, где записывается аналитическое решение. Либо нужно определить из полученного решения поле скоростей на дискретной сетке в физической плоскости и находить текущие значения компонент скорости газа с помощью интерполирования. В §1 предлагается метод расчета траекторий аэрозольных частиц в плоском стационарном потоке, основанный на преобразовании уравнений их движения к переменным годографа скорости несущей среды. Такой подход существенно упрощает процедуру интегрирования уравнений движения и повышает точность результатов.

Приводится постановка задачи об аспирация аэрозоля в щель, образованную двумя полубесконечными параллельными пластинами (модель щелевого пробоотборника). Считается, что на бесконечности вне щели среда находится в равномерном движении. В рамках модели отрывного потенциального течения получено аналитическое представление поля скоростей несущей среды. Проведены теоретические исследования аспирации при варьировании отношения скорости

набегающего потока U_0 к скорости аспирации U_a (осредненная скорость во входном сечении пробоотборника) $a = U_0 / U_a$. Исследовано влияние “вторичной аспирации”, т.е. отскока частиц от внешней стенки щели (рис.1). Теоретически показано немонотонное поведение коэффициента аспирации в области малых значений отношения скорости потока к скорости аспирации (рис.2). Построена модель аспирации аэрозоля из неподвижного воздуха с учетом испарения. В рамках диффузионной модели испарения проведено параметрическое исследование счетного и массового коэффициентов аспирации в зависимости от размера частиц при различной относительной влажности воздуха. Начиная с некоторого значения диаметра частицы, счетный коэффициент аспирации для испаряемых частиц становится большим коэффициента аспирации, полученного при отсутствии испарения.

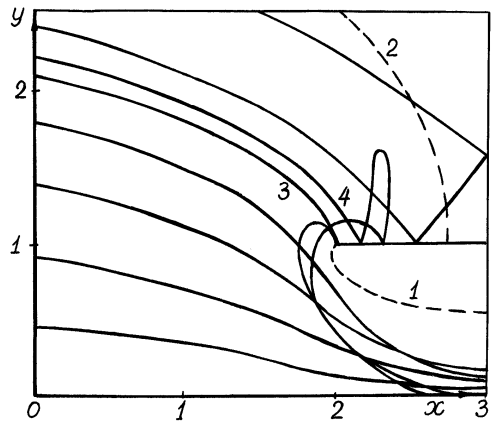


Рис 1. Траектории частиц для случая St=1, $a = 0.19$, k=1. Штриховые кривые 1 и 2 – свободная поверхность и разделительная линия тока. Кривые 3, 4 - предельные траектории без учета и с учетом отскока.

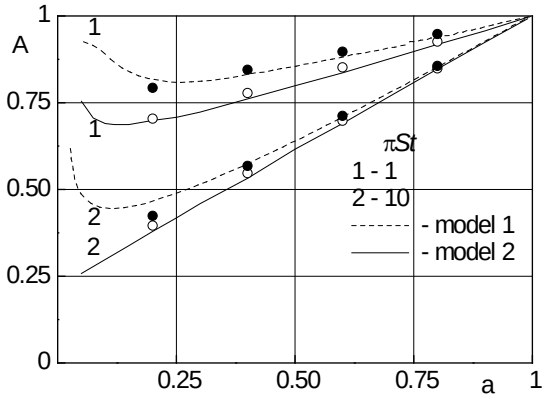


Рис.2. Зависимость коэффициента аспирации A от параметра a, рассчитанного в рамках моделей отрывного (model 1) и безотрывного обтекания (model 2). Кружки- значения по приближенной формуле (Волощук, 1971).

Это объясняется увеличением невозмущенной области их захвата и, следовательно, количества уловленных частиц. В то же время коэффициент аспирации, определяемый как отношение массовых концентраций, при учете влияния испарения уменьшается. Несмотря на большее количество уловленных частиц, их общая масса существенно меньше из–за снижения веса частиц в результате испарения. С

увеличением влажности среды уменьшается влияние испарения на эффективность аспирации.

§2 посвящен задаче об аспирации аэрозоля в щелевой пробоотборник в рамках модели безотрывного течения. Предложена математическая модель аспирации аэрозоля в щель между двумя пластинами (модель щелевого пробоотборника) при двух углах расположения щели относительно направления ветрового потока: 0 и π. На бесконечности вдали от щели среда находится в равномерном движении. Представление компонент скорости течения в виде функции от одной из координат y и от ψ (функции тока), а также добавление уравнения для функции тока вдоль траектории частицы существенно упростило интегрирование уравнений движения частицы. Записаны формулы для разделительной линии тока. Проведены параметрические расчеты коэффициента аспирации для различных чисел Стокса и отношений скорости аспирации к скорости набегающего потока. Дано сравнение с результатами расчетов, проведенных в приближении отрывного обтекания (рис.2). Обсуждается немонотонное поведение коэффициента аспирации в области малых значений отношения скоростей a, что может быть связано как с чисто инерционными эффектами, так и с влиянием отскока частиц от внешней стенки. Выявлено существование зависящей от отношения величин скоростей ветра и аспирации верхней границы размера частиц, улавливаемых пробоотборником при противоположном направлении скорости аспирации и скорости набегающего потока.

В §3 предлагается математическая модель аспирации аэрозоля в цилиндрический пробоотборник из низкоскоростного нисходящего потока и из неподвижной среды с учетом конечных размеров входного отверстия. На основе численного интегрирования уравнений движения частиц в найденном аналитически поле скоростей несущей среды и определения предельных траекторий проведены параметрические исследования коэффициента аспирации при изменении числа Стокса для различных отношений скоростей набегающего потока и аспирации и различной скорости седиментации. В задаче аспирации из низкоскоростного потока и из неподвижного воздуха сила тяжести становится важным фактором,

влияющим на коэффициент аспирации. В предельных случаях безинерционных и сильноинерционных частиц аддитивный вклад силы тяжести пропорционален стационарной скорости оседания. При промежуточных значениях числа Стокса коэффициент аспирации определяется совместным действием инерционных и гравитационных сил. Для пробоотборника, ориентированного отверстием вниз, при малых значениях ширины отверстия и скорости седиментации возможно осаждение частиц на нижней стороне цилиндра, приводящее к провалам в распределении зависимости коэффициента аспирации от числа Стокса (рис.3, h – относительная ширина входной щели).

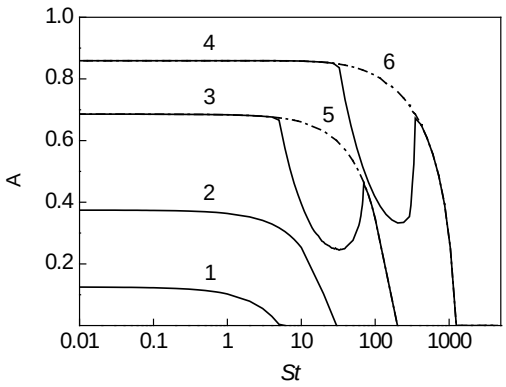


Рис. 3. Зависимость $A(St)$ в случае ориентации пробоотборника отверстием вниз при a=0 и различных значениях v_s (1 – 0.014; 2 – 0.01; 3, 5 – 0.005; 4, 6 – 0.002) для h=0.016 (1– 4) и h=0.16 (5, 6).

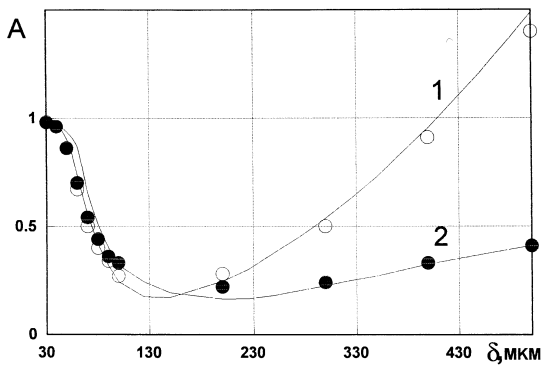


Рис.4. Зависимость коэффициента аспирации A от диаметра частицы δ (кривая 2 соответствует стоксову сопротивлению, U_a=5м/с, радиус трубки R_0=0.5см). Кружки: данные из работы Dunnett, 1992.

Осесимметричным задачам аспирации аэрозоля посвящена **глава 2**. В §4 метод расчета траекторий аэрозольных частиц в плоскости годографа скорости обобщен для случая осесимметричного течения. Решена задача аспирации аэрозоля в круглую тонкостенную трубку из неподвижной среды. Несущая среда моделируется в рамках приближения осесимметричного потенциального течения несжимаемой жидкости. Поле скоростей газа строится с помощью эффективного численно–аналитического метода. В плоскости переменных годографа скорости формулируется краевая задача для функции тока. Последняя представляется в виде суммы сингулярной и регулярной составляющих. Для определения сингулярной составляющей используется метод малого

параметра, приводящий к решению обыкновенных дифференциальных уравнений. Регулярная составляющая отыскивается конечно–разностным методом из решения последовательности линейных краевых задач. Уравнения движения частиц численно интегрируются в плоскости годографа скорости. Рассчитан коэффициент аспирации при варьировании числа Стокса и скорости седиментации. Получено хорошее согласование расчетных результатов с известными экспериментальными данными и другими расчетными результатами. Для частиц больших размеров закон Стокса может значительно отличаться от реального закона сопротивления. Влияние отклонения реального сопротивления от стоксового закона демонстрирует рис.4, где приведена зависимость коэффициента аспирации от диаметра частицы. Модель с использованием стоксового сопротивления предсказывает заниженные значения коэффициента для частиц больших размеров.

В §5 развита математическая модель аспирации аэрозоля в трубку, расположенную на бесконечном цилиндрическом теле (упрощенная модель аспирации в персональные пробоотборники). Течение несущей среды представляется ламинарным вязким осесимметричным течением несжимаемой жидкости. Для расчета поля скоростей газа в приближении уравнений Навье–Стокса используется программа ANSYS/Flotran. Уравнения движения частиц в найденном поле скоростей газа решаются численно методом Рунге–Кутта, на каждом шаге по времени текущие значения составляющих скорости газа определяются интерполированием. Проведены параметрические расчеты при различных длинах входной трубки и скоростях набегающего потока. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии тела за трубкой на коэффициент аспирации. Этот эффект усиливается при уменьшении длины трубки. В присутствии цилиндра сзади аспирирующей трубки зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса носит немонотонный характер, схожий с зависимостью коэффициента аспирации от числа Стокса для тупоголовых пробоотборников. Эффективность аспирации может оказываться отличной от единицы, в том числе и для изокинетического случая (равные скорости ветра и аспирации) – см.рис.5.

В главе 3 исследуется коэффициент захвата аэрозольных частиц сферой и коэффициент аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник. В §6 предложен новый подход к определению предельных траекторий в

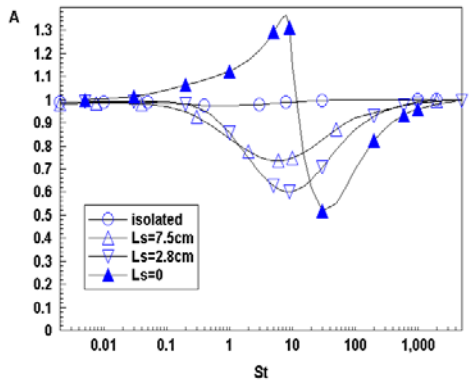


Рис. 5. Зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса при $U_0 = U_a$ =0.5м/с (L_S – длина трубки).

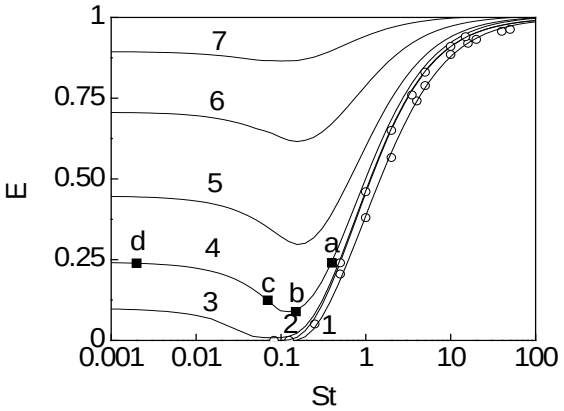


Рис. 6. Зависимость коэффициента захвата от числа Стокса для разных значений скорости стационарного оседания 1 – цилиндр, 2-7: v_s=0, 0.1,0.25,0.5,1,2.

задачах механики аэрозолей, основанный на формулировании краевой задачи для уравнений движения частиц. С помощью этого подхода исследован коэффициент захвата аэрозольных частиц сферой в потоке газа при учете влияния силы тяжести. Рассчитаны коэффициент захвата и относительная площадь сферической поверхности, покрытой частицами, при изменении числа Стокса для различных скоростей гравитационного оседания. Показано немонотонное поведение коэффициента захвата в случае учета влияния силы тяжести (рис.6). Для малых чисел Стокса при отсутствии инерционного улавливания осаждение частиц на сфере полностью определяется седиментацией. Предложенный подход к расчету предельных траекторий может быть использован при расчете коэффициента захвата для препятствий произвольной формы и при учете других сил, действующих на частицы, а также при определении коэффициента аспирации в задачах о пробоотборе аэрозольных частиц.

Одним из типов пробоотборников, широко используемых для аэрозольных измерений в атмосфере и производственных помещениях, является пробоотборник со сферической головкой с одним круговым отверстием. Повышенный интерес к такому пробоотборнику вызван тем, что поведение частиц при аспирации в него может быть близко к

поведению частиц в окрестности головы человека в процессе дыхания. Знание основных закономерностей динамики частиц при аспирации даст важную информацию для анализа попадания пылевых частиц в легкие человека. В §7 предложена математическая модель аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник в неподвижном воздухе. Вдали от пробоотборника воздух считается неподвижным, а аэрозольные частицы падают под действием гравитации (рис.7). Часть падающих частиц захватывается в сферический пробоотборник диаметра D через входное отверстие диаметра d, ориентированное под разными углами относительно направления силы тяжести (обычно $H=d/D<<1$). Угол α в плоскости симметрии $z=0$ между обратным направлением оси x и линией, соединяющей центр входного отверстия с началом координат, меняется от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Из условия баланса потока частиц коэффициент аспирации A выражается в виде $A=V_sS/Q=4V_sS/U_a\pi d^2$, где S площадь поперечного сечения трубки предельных траекторий вдали от пробоотборника, $V_s=\tau g$ – скорость стационарного гравитационного осаждения частицы, $U_a=4Q/(\pi d^2)$ – скорость аспирации, Q – расход газа через аспирирующее отверстие. Определение области S сводится к расчету предельных траекторий на основе решения уравнений движения частиц в заданном поле скоростей. Движение несущей среды вокруг пробоотборника вызывается аспирацией воздуха и частиц через входное отверстие пробоотборника. В приближении потенциального течения несжимаемой жидкости поле скоростей вокруг пробоотборника определяется как сумма полей скоростей, создаваемых отдельными точечными стоками, равномерно распределенными по входному отверстию (конечномерный сток). Суммарное поле скоростей вычисляется как суперпозиция полей скоростей от отдельных точечных стоков. Для одиночного точечного стока мощности Q, расположенного в точке $(-1,0,0)$ в безразмерной системе координат (x,y,z) (радиус сферы $D/2$ и скорость аспирации U_a выбираются в качестве масштаба линейного размера и скорости) декартовы составляющие скорости газа получаются в виде

$$u_x = \frac{H^2}{4}\left(\frac{1}{r} - \frac{r^2+3+4x}{r_1^3}\right), \quad u_y = \frac{H^2}{4} y\left(\frac{2x+1}{r_2} - \frac{2}{r_1^3}\right), \quad u_z = \frac{H^2}{4} z\left(\frac{2x+1}{r_2} - \frac{2}{r_1^3}\right), \qquad (1)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad r_1^2 = r^2 + 2x + 1, \quad r_2 = r^2 r_1 (x+1) + r r_1^2 x .$$

Для описания движения частиц используются безразмерные уравнения, записанные в предположении стоксового закона сопротивления и учитывающие гравитацию. Описанная математическая модель включает в себя четыре безразмерных параметра St, v_s, α, H.

Характер траекторий частиц вокруг сферического пробоотборника определяется наличием и местоположением стационарных точек уравнений движения аэрозольных частиц. Особые точки являются точками покоя, то есть скорость частицы в них обращается в нуль. Для $\alpha \neq \pm\pi/2$ все стационарные точки располагаются в меридиональной плоскости $z=0$ и определяются из системы нелинейных алгебраических уравнений, получающейся из условия равенства нулю правых частей уравнений движения частиц:

$$\begin{aligned}
&\frac{H^2}{4}\left(\frac{1}{r} - \frac{r^2+3+4(x\cos\alpha - y\sin\alpha)}{r_1^3}\right) = -v_s \sin\alpha, \\
&(x\sin\alpha + y\cos\alpha)\frac{H^2}{4}\left(\frac{2(x\cos\alpha - y\sin\alpha)+1}{r_2} - \frac{2}{r_1^3}\right) = v_s\cos\alpha, \qquad (2)\\
&r^2 = x^2 + y^2, \quad r_1^2 = r^2 + 2(x\cos\alpha - y\sin\alpha) + 1, \\
&r_2 = r^2 r_1 (x\cos\alpha - y\sin\alpha + 1) + r r_1^2 (x\cos\alpha - y\sin\alpha).
\end{aligned}$$

Результаты численного решения системы (2) показаны на рис.8. Замкнутые кривые, соответствующие различным значениям v_s, получены вариацией α. Значки на кривых соответствуют определенным значениям угла α. Для всех значений скорости седиментации кривые геометрических мест особых точек пересекают сферу в точках $x = \pm 1, y = 0$. Получены критерии существования в области решения одной и двух особых точек, связывающие значения скорости осаждения, угла ориентации и относительного диаметра входного отверстия:

$$\begin{aligned}
&v_{s1} = H^2 \sin\alpha[1/\sin(\alpha/2) - 1]/4, \; x = -1, y = 0 \\
&v_{s2} = H^2 \sin\alpha[1/\cos(\alpha/2) - 1]/4), \; x = 1, y = 0
\end{aligned} \qquad (3)$$

Поведение функций (3) при $0 \le \alpha \le \pi/2$ показано на рис.9. В плоскости (v_s,α) можно выделить три области: I ($v_s > v_{s1}$) – особые точки вне сферы отсутствуют, II ($v_{s2} < v_s \le v_{s1}$) – в плоскости симметрии z=0 существует единственная особая точка, лежащая за пределами сферы, III ($v_s \le v_{s2}$) – в плоскости z=0 существуют две особые точки. К области II относится также область $\alpha \le 0$ при любых v_s.

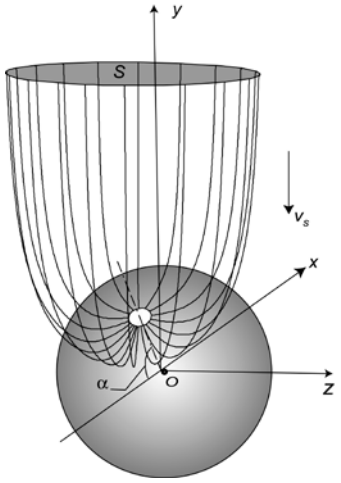


Рис.7. Поверхность предельных траекторий и область захвата частиц S при аспирации в сферический пробоотборник из неподвижной среды

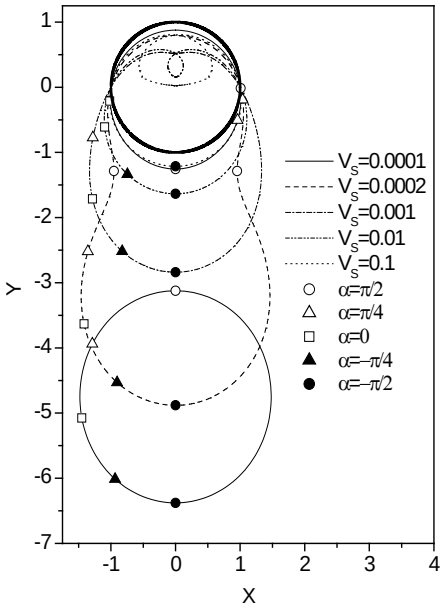


Рис.8. Кривые местоположения особых точек в зависимости от v_s и α. Жирная линия соответствует проекции сферы на плоскость z=0.

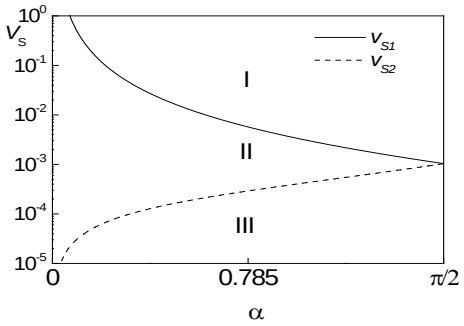
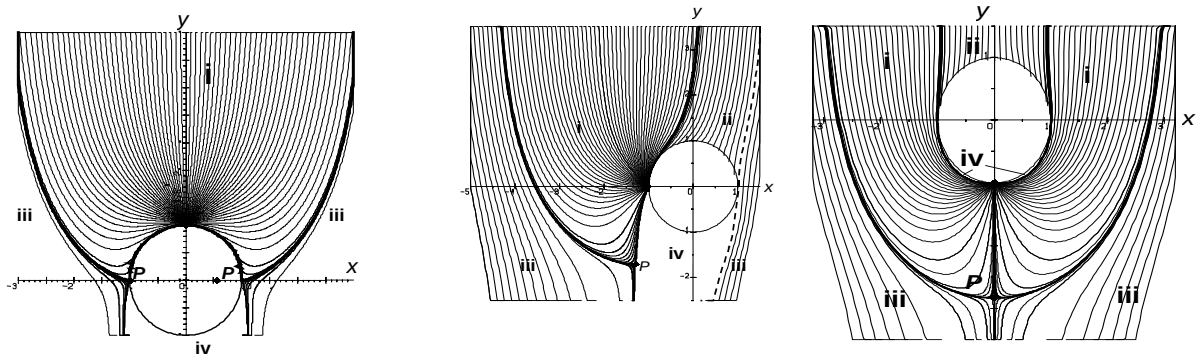


Рис.9. Функции v_{s1} , v_{s2} и области I – III в плоскости (v_s ,α).

Для определения предельных траекторий можно поставить краевую задачу или искать их, решая задачу Коши с использованием алгоритма пристрелки. В расчетах использовались оба подхода, что позволило контролировать точность результатов. Поведение траекторий аэрозольных частиц и форма поперечного сечения трубки предельных траекторий зависит как от числа Стокса и скорости гравитационного осаждения, так и от угла ориентации пробоотборника относительно направления силы

тяжести. В общем случае в окрестности пробоотборника можно выделить четыре характерные зоны: зона (i) траекторий аспирируемых частиц, зона (ii) траекторий частиц, которые оседают на сфере, зона (iii) траекторий частиц, проходящих мимо пробоотборника, и зона (iv), не занятая частицами (рис.10). Предельные траектории на рис.10 выделены жирными линиями. При параметрах v_s и α, попадающих в области II и III, аспирирующее отверстие становится сопряженным с областью без частиц, т.е. наряду с аэрозолем будет аспирироваться дополнительно чистый воздух и, следовательно, коэффициент аспирации будет меньше единицы.



α=π/2 α=0 α=-π/2

Рис.10. Траектории в плоскости z=0 (а) для St=1, v_s=0.001, H=0.1.

Проведены параметрические исследования коэффициента аспирации A при варьировании числа Стокса St, скорости седиментации v_s,, угла ориентации пробоотборника α в рамках моделей одиночного и конечномерного стоков. Зависимости коэффициента аспирации от числа Стокса, рассчитанные для $\alpha = \pi/2$ и различных значений v_s и N, показаны на рис.11. Коэффициент аспирации, рассчитанный в рамках модели конечномерного стока, перестает быть чувствительным к числу моделируемых точечных стоков N, начиная с N=91, поэтому для сравнения приведены результаты расчетов для N=91 и одиночного стока N=1. Закрашенными квадратами показаны соответствующие экспериментальные результаты из работы Su&Vincent (J. Aerosol Sci., 2003. P.1151–1165). Общая закономерность в поведении коэффициента аспирации заключается в наличии участка с практически

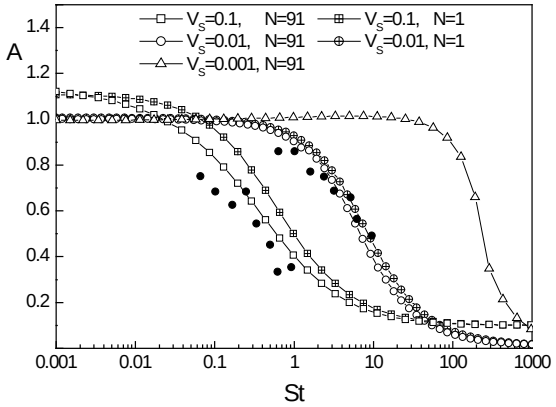


Рис.11 Зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса при различных v_s для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вверх. Черные кружки – экспериментальные точки Su,Vincent (2003).

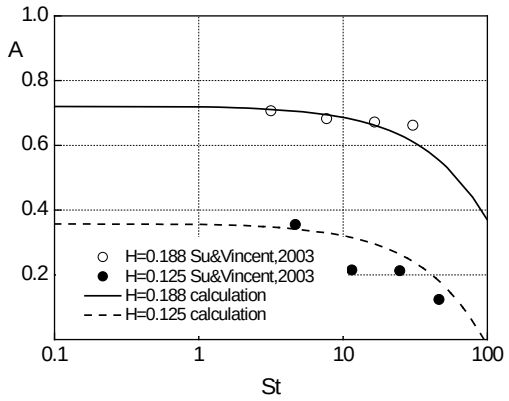


Рис.12. Зависимость *A(St)* для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вниз ($\alpha = -\pi/2$), при v_s=0.01 и двух значениях. Кружки – экспериментальные точки Su,Vincent (2003).

постоянным значением, определяемым при малых числах Стокса формулой A=1+v_s, что соответствует практически безинерционному движению частиц. При этом меньшим значениям скорости седиментации соответствует большая длина такого участка. Отличие от единицы коэффициента аспирации обусловлено только дополнительным попаданием в пробоотборник частиц за счет седиментации. Далее при умеренных числах Стокса имеется переходный участок, на котором проявляется влияние инерции на аспирацию. При дальнейшем увеличении числа Стокса коэффициент аспирации падает до A=v_s. Наблюдается хорошее согласование результатов расчета по предложенной модели и экспериментальных данных. Модель конечномерного стока для v_s=0.1 дает лучшее согласование с экспериментальными точками. С уменьшением скорости оседания v_s разница между моделью одиночного и конечномерного стока становится меньше, при v_s=0.01 значения коэффициента аспирации, рассчитанные по обеим моделям, близки к экспериментальным. В случае v_s=0.001 коэффициенты аспирации, полученные по двум моделям, практически совпадают. Существует диапазон изменения числа Стокса (размеров частиц), для которого коэффициент аспирации при горизонтальной ориентации больше коэффициента аспирации при вертикальном положении пробоотборника с отверстием вверх ($\alpha = \pi/2$). Часть частиц, движущихся к входному отверстию, сталкивается со сферической поверхностью и не попадает в

пробоотборник. При горизонтальном положении отверстия сферическая поверхность препятствует попаданию частиц в пробоотборник только с одной стороны, что может приводить к большей области захвата частиц вдали от пробоотборника.

С учетом экранирования сферой падающих частиц коэффициент аспирации безинерционных частиц (St=0) для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вниз ($\alpha = -\pi/2$), выражается формулой $A = 1 + v_s(1 - H^{-2})$. Из условия $A = 0$ получим формулу $v_s = H^2/(1 - H^2)$ для скорости седиментации, начиная с которой частицы не будут попадать в пробоотборник. Результаты расчетов зависимости *A(St)* при v_s=0.01 и двух значениях H для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вниз ($\alpha = -\pi/2$), показаны на рис.12. Кружки соответствуют экспериментальным данным из упомянутой работы Su,Vincent(2003). Наблюдается хорошее согласование результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Глава 4 посвящена моделированию течений аэрозоля в струйных импакторах и инерционных воздухочистителях. В § 8 приводится постановка и решение задачи о течения аэрозоля в плоском струйном импакторе, улавливающая поверхность которого содержит углубление прямоугольной формы. Несущая среда моделируется потенциальным течением идеальной несжимаемой жидкости. Струя, вытекающая с отрывом из щелевого сопла, растекается по бесконечной плоскости, содержащей прямоугольное углубление. Получено аналитическое решение для комплексно–сопряженной скорости. Для удобства интегрирования уравнения движения частиц преобразуются к переменным в параметрической плоскости. Рассчитаны предельные траектории частиц, разделяющие поток импактируемых частиц от частиц, проходящих в следующую ступень импактора. Построены кривые эффективности осаждения частиц в зависимости от числа Стокса при различных глубинах выемки (рис.13). Два основных механизма влияют на процесс осаждения частиц в импакторе с углублением. С увеличением глубины выемки растет поверхность импакции за счет боковой стенки, и, следовательно, возрастает эффективность захвата частиц. Кривые эффективности

сдвигаются в сторону меньших чисел Стокса. Вместе с тем при больших глубинах увеличивается вынос частиц из выемки за счет обратного потока, и поэтому, начиная с некоторой глубины, кривые эффективности осаждения снова возвращаются в область больших чисел Стокса.

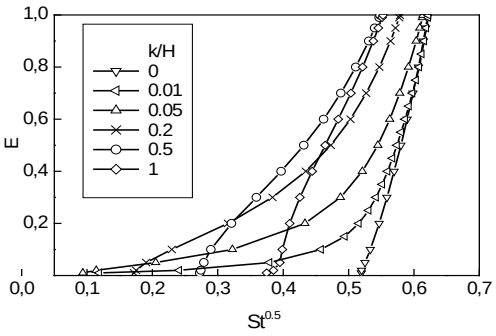


Рис.13. Эффективность осаждения в зависимости от $\sqrt{St}$ для различных k/H (относительная глубина выемки).

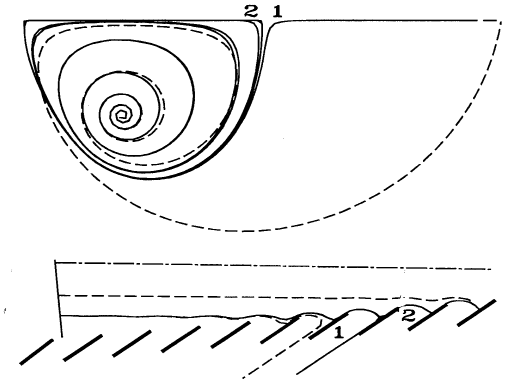


Рис.14. Линия тока газа (штриховая линия) и траектория частицы при St=0.075 (кривая 1) и St=0.0781 (кривая 2) в физической плоскости и в плоскости годографа скорости газа.

В §9 дается постановка и решение задачи о течении запыленного газового потока в коническом инерционном воздухоочистителе, представляющем собой набор конических колец с постепенно уменьшающимися диаметрами и закрепленными в одном конусном каркасе на некотором расстоянии одно от другого. Для описания течения несущей среды, моделируемой плоским стационарным потоком несжимаемой жидкости, используется известное решение задачи о струйном обтекании бесконечной решетки пластин. В предположении об отсутствии обратного влияния частиц пыли на газовый поток расчет траекторий частиц осуществляется численным интегрированием уравнений движения частиц (рис.14). При моделировании движения частиц учитывается их многократное отражение от пластин. Исследован процесс сепарации пыли в зависимости от основных конструктивных параметров решетки: угла наклона фронтальной поверхности решетки, шага пластин и угла их установки. Построена приближенная формула для коэффициента пропуска пыли E

$$E = \frac{\sigma(\delta^*)}{1+q}, \qquad \delta^* = \sqrt{\frac{\mu H}{\rho_p U_\infty} \frac{(0.238\alpha + 0.0018\alpha^2 \operatorname{Re}_p^{0.35})\sin\beta}{\sin\alpha + \sin(\alpha+\beta)}}$$

где $\sigma(\delta)$ - интегральное весовое распределение частиц по размерам, q – доля газа, попадающего в пылесборник, U_∞ - скорость невозмущенного потока газа, α - угол между $\bar{U}_\infty$ и фронтальной поверхностью решетки, H - шаг решетки, β - угол ориентации пластинок решетки относительно фронтальной поверхности.

В §10 исследуется задача о течении газа с взвешенными частицами в канале с вертикальным экраном, обеспечивающим улавливание частиц за счет как седиментационного, так и инерционного механизмов. Для описания течения несущей среды в приближении потенциального течения несжимаемой жидкости используется известное решение задачи об истечении из сосуда с симметричным отверстием. Проведены параметрические исследования эффективности осаждения частиц в канале с вертикальным экраном. Варьировались геометрические параметры и параметры дисперсного потока. Начиная с некоторой высоты экрана, наблюдается резкий рост эффективности осаждения частиц на дно канала, обусловленный совместным действием седиментации и инерционных сил.

Глава 5 посвящена моделированию динамики растущей аэрозольной капли в термодиффузионной камере и движению капель в линейной цепочке. В §11 предлагается математическая модель движения аэрозольной частицы в термодиффузионной камере под воздействием термодиффузиофореза и силы тяжести с учетом фазовых переходов на поверхности жидкой частицы. Модель, описывающая динамику частицы в режиме сплошной среды, включает в себя уравнение движения частицы и уравнение для изменения радиуса частицы в процессе конденсации. Зависимостью кинетических коэффициентов от температуры и состава смеси пренебрегается. Получены аналитическое и численное решения рассматриваемой задачи. Исследовано движение растущей частицы до точки максимального подъема. Предложена формула для высоты максимального подъема капли. Дано сравнение теоретических расчетов применительно к системе диоктилфталат–инертный газ ($DOP - H_2$, $DOP - He$) с экспериментальными данными и с результатами,

полученными в рамках свободномолекулярной теории. Предложенная в работе модель в целом лучше согласуется с экспериментом.

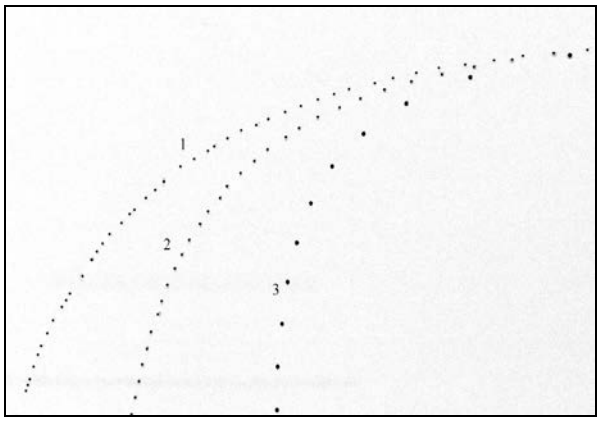


Рис.15. Картина генерируемой горизонтально цепочки капель с начальной скоростью 2.39 м/с и частотой генерации 160(3), 500(2) и 800(1) капель/с. Размер фото 18.0*10.8 мм^2.

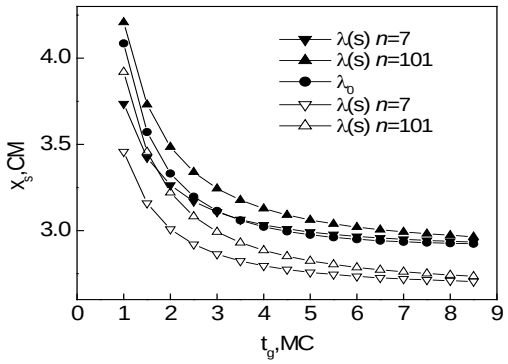


Рис.16 Зависимость расстояния, проходимого каплями, от времени генерации капель t_g для горизонтальной струи. Черные и белые треугольники - расчет с учетом и без учета силы Бассе. Экспериментальные данные: черные кружки.

В §12 представлены результаты экспериментов и математическая модель движения аэрозольных капель в линейной цепочке частиц. Капельный генератор инициирует в неподвижный воздух монодисперсные частицы размером d=73 мкм в горизонтальном и вертикальном направлениях в диапазоне скоростей 1.5–3 м/с. Время t_g между генерацией отдельных капель варьируется от 1 до 8 мс. Число Рейнольдса частицы для рассматриваемого замедленного движения меняется от 10 до 0.5. При уменьшении t_g в экспериментах начинает проявляться гидродинамическое взаимодействие частиц, приводящее к росту расстояния, проходимого частицей (рис.15). Для описания движения капли в цепочке используется уравнение движения с модифицированным временем релаксации частицы $\tau^* = \tau_{St} / \lambda(s)$, включающим в себя ослабление $\lambda(s)$ сопротивления ведомой капли в следе ведущей как функцию расстояния между каплями s. Уравнение движения учитывает также силу Бассе, приводящую для замедляющегося движения к увеличению расстояния, проходимого каплями. Для задания зависимости $\lambda(s)$ используются результаты расчетов коэффициента сопротивления срединной сферы при обтекании линейного ряда из 7 и 101 сферы, полученных в работе Gluckman et al.

(J.Fluid Mech., 1971. P.705–740.) в рамках теории стационарного течения Стокса. Проведены численные расчеты для условий эксперимента. Наблюдается хорошее согласование зависимости расстояния, проходимого каплей, от времени генерации t_g, полученное из эксперимента и по предложенной модели (рис.16).

В **заключении** отмечается, что в рамках диссертационной работы разработаны новые численно-аналитические модели и исследованы современные задачи теории аспирации и инерционной сепарации аэрозолей. Решение всех описанных задач и полученные результаты являются развитием теории течений газа с взвешенными частицами и теории пробоотбора аэрозолей.

Основные результаты и выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

Предложен эффективный метод расчета траекторий частиц с использованием переменных в плоскости годографа скорости или в параметрической плоскости для плоских и осесимметричных течений газа с взвешенными частицами.

Решены задачи об аспирации аэрозоля из движущегося и неподвижного газа в щелевой и цилиндрический пробоотборники в рамках моделей безотрывного и отрывного потенциального течения несжимаемой жидкости. Исследовано влияние отскока частиц от внешней стенки щели (“вторичная аспирация”). Показано немонотонное поведение коэффициента аспирации в области малых значений отношения a скорости ветра к скорости аспирации. Рост коэффициента аспирации с уменьшением a наблюдается и при отсутствии вторичной аспирации, учет отскока делает это возрастание еще более существенным. В задаче аспирации из низкоскоростного потока и из неподвижного воздуха сила тяжести становится важным фактором, влияющим на коэффициент аспирации. Коэффициент аспирации в цилиндрический пробоотборник определяется совместным действием инерционных и гравитационных сил. Показано, что для пробоотборника, ориентированного отверстием вниз, при малых значениях ширины отверстия и скорости седиментации

аэрозольные частицы могут оседать на нижней стороне цилиндра рядом с входным отверстием.

Решены задачи об аспирации аэрозоля в круглую тонкостенную трубку из неподвижной среды и в трубку, расположенную на цилиндрическом теле, из движущегося газа. Показано, что в случае аспирации в трубку из неподвижного воздуха модель с использованием стоксового сопротивления предсказывает заниженные значения коэффициента для частиц больших размеров. Исследовано влияние цилиндрического тела за трубкой на коэффициент аспирации в подвижном воздухе. В присутствии цилиндра сзади аспирирующей трубки зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса носит немонотонный характер, как в случае тупоголовых пробоотборников. Влияние заднего тела усиливается с уменьшением длины аспирирующей трубки.

Предложен новый метод определения предельных траекторий в задачах механики аэрозолей, основанный на постановке и решении краевой задачи для уравнений движения частиц. Исследован процесс осаждения аэрозольных частиц на сфере в потенциальном потоке газа при учете влияния силы тяжести. Рассчитаны коэффициент захвата и относительная площадь сферической поверхности, покрытой частицами, при изменении числа Стокса для различных скоростей гравитационного оседания. Показано немонотонное поведение коэффициента захвата в случае учета влияния силы тяжести. Для малых чисел Стокса при отсутствии инерционного улавливания осаждение частиц на сфере определяется седиментацией. Предложенный подход к расчету предельных траекторий может быть использован при расчете коэффициента захвата для препятствий произвольной формы и при учете других сил, действующих на частицы, а также при определении коэффициента аспирации в задачах о пробоотборе аэрозольных частиц.

Решена задача об аспирации из неподвижного воздуха в сферический пробоотборник. Поведение траекторий аэрозольных частиц определяется как числом Стокса и скоростью гравитационного осаждения, так и углом ориентации пробоотборника относительно направления силы тяжести.

Развита теория особых точек уравнений движения частиц в окрестности сферы с аспирацией. Исследованы координаты особых точек как функций скорости гравитационного осаждения и угла ориентации пробоотборника. Получены критерии существования в области решения одной и двух особых точек, связывающие значения скорости осаждения, угла ориентации и относительного диаметра входного отверстия, а также указывающие на явление дополнительного подсоса воздуха без частиц. Развитая модель аспирации в сферический пробоотборник с учетом конечных размеров входного отверстия хорошо согласуется с экспериментальными данными. В некотором диапазоне изменения числа Стокса (размеров частиц) коэффициент аспирации при горизонтальной ориентации будет выше, чем при вертикальном расположении пробоотборника отверстием вверх. Коэффициент аспирации безинерционных частиц для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вниз, выражается формулой, учитывающей экранирование частиц.

Исследовано осаждение аэрозольных частиц в струйном импакторе с углублением на поверхности импакции. Увеличение глубины выемки приводит к сдвигу кривых эффективности осаждения в сторону меньших чисел Стокса из-за появления дополнительной поверхности импакции - боковой стенки. При некоторой глубине усиливается вынос частиц из выемки за счет обратного потока, и поэтому кривые эффективности осаждения возвращаются в область больших чисел Стокса.

Исследована эффективность осаждения частиц в канале с вертикальным экраном в зависимости от геометрических параметров и параметров дисперсного потока. При некоторой высоте экрана наблюдается резкий рост эффективности осаждения частиц на дно канала, обусловленный совместным действием седиментации и инерционных сил.

Развита математическая модель движения растущей аэрозольной частицы в термодиффузионной камере с учетом процессов термодиффузиофореза и силы тяжести. Получено хорошее согласование расчетов по предложенной модели с экспериментальными значениями

подъема капли. Построена аналитическая формула для высоты подъема капли.

Развита математическая модель для описания движения аэрозольных капель, генерируемых с одинаковыми скоростями в неподвижный воздух, с учетом гидродинамического взаимодействия. Взаимодействие частиц в линейной цепочке приводит к увеличению расстояния, проходимого частицами. Показано, что экспериментальные траектории хорошо описываются уравнением движения частицы с учетом силы Бассе и закона ослабления сопротивления, рассчитываемого в рамках стационарного течения Стокса при обтекании линейного ряда сфер.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Зарипов Ш.Х. Расчет траекторий аэрозольных частиц в плоскости годографа скорости / Зарипов Ш.Х. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1994. – N 3. – С.129-134.
2. Зарипов Ш.Х. Об аспирации аэрозоля в щель между двумя пластинами / Зарипов Ш.Х., Киселев О.М. // Известия РАН, Физ. атмосферы и океана. – 1996. – Т.32. – N4. – С.487-491.
3. Зарипов Ш.Х. Расчет течения запыленного газа в инерционном воздухоочистителе / Арасланов Ш.Х., Зарипов Ш.Х. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1996. – N6. – С.62-68.
4. Zaripov Sh.Kh. Deposition of aerosol particles in the flat channel with vertical screen // Environ.Radioecology & Appl.Ecology. – 1997. – V.3. – N.3. – P.3-9.
5. Зарипов Ш.Х. Течение запыленного газа в плоском канале с вертикальным экраном // Труды 1-й Международной конференции "Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизированное проектирование в авиа- и машиностроении", 21-27 сентября 1997г., Казань, Россия.– Т.1.–С.77-81.
6. Зарипов Ш.Х. Математическое моделирование аэрозольных течений / Арасланов Ш.Х., Зарипов Ш.Х., Киселев О.М. // Фонд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ РТ. Фундаментальные науки. Конкурс проектов ’96. Отчеты. - Казань: Унипресс, 1998. – С.412-423.

7. Zaripov Sh.Kh. Aerosol sampling study using ANSYS/FLOTRAN CFD code / Fokin D.A., Zaripov Sh.Kh. // Proceeding of the 17–th German CADFEM meeting. – Sonthofen. – 6-8 October 1999. – N 1.2.9.
8. Зарипов Ш.Х. Аспирация аэрозоля в трубку из неподвижной среды / Зарипов Ш.Х., Зигангареева Л.М., Киселев О.М. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2000. – N2. – С.104-109.
9. Zaripov Sh.Kh. Numerical study of aerosol sampling into a tube located on infinite cylinder / Fokin D.A., Zaripov Sh.Kh. // Международная аэрозольная конференция, посвященная памяти профессора А.Г.Сутугина. – Труды конференции. – Москва. – 26-30 июня 2000г. – С.230-236.
10. Zaripov Sh.Kh. Continuum regime motion of a growing droplet in opposing thermo-diffusiophoretic and gravitational fields of a thermal diffusion cloud chamber / Bakanov S.P., Smolík J., Zaripov Sh.Kh. and Ždímal V. // J. of Aerosol Science. – 2001. – V.32. – P.341-350.
11. Зарипов Ш.Х. Движение аэрозольной частицы в термодиффузионной камере / Баканов С.П., Ждимал В., Зарипов Ш.Х, Смолик И. // Прикладная математика и механика. – 2002. – Т.66. – Вып.1.-С.95-101.
12. Зарипов Ш.Х. Аспирация аэрозоля в щелевой пробоотборник при двух углах его ориентации / Ванюнина М.В., Зарипов Ш.Х., Скворцов Э.В. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2002. – N3. – С.108-113.
13. Zaripov S.K. Deposition of aerosol particles on a sphere: the role of gravity / Galeev R.S., Zaripov S.K. // Aerosol Science and Technology. – 2003.– V37. –325-329.
14. Zaripov S.K. Theoretical study of aerosol sampling by an idealised sampler in calm air / Galeev R.S., Zaripov S.K. // J. of Aerosol Science, 2003.– V.34.– N9.–P.1135-1150.
15. Зарипов Ш.Х. Численное исследование отбора аэрозольных частиц в движущемся газе / Зарипов Ш.Х., Фокин Д.А. // Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. – Т. 3. – Материалы Всерос. научной конф. “Краевые задачи и их приложения”, Казань, 18-24 октября 1999 г. – Казань: Унипресс, 1999. – С. 159-163.

16. Зарипов Ш.Х. Аспирация аэрозоля в сферический пробоотборник в неподвижном воздухе / Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х.// Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. – Материалы XVI сессии Междунар. Школы по моделям механики сплошной среды, 27 июня –3 июля 2002 г. – Казань: Изд. Казанск. матем. общ–ва, 2002. – С.138 –142.
17. Зарипов Ш.Х. Краевая задача для предельных траекторий аэрозольных частиц / Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х. // На рубеже веков. Научно-исследовательский институт математики и механики им Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета, 1998-2002. – Казань: Казанское математическое общество, 2003.–С.452-457.
18. Зарипов Ш.Х. Математические модели течений аэрозоля в измерительных устройствах / Зарипов Ш.Х. // На рубеже веков. Научно-исследовательский институт математики и механики им Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета, 1998-2002. – Казань: Казанское математическое общество, 2003.–С.457-461.
19. Zaripov Sh.Kh. Numerical analysis of aerosol flows by means of velocity hodograph variables / Kiselev O.M., Zaripov Sh.Kh. // Extended abstracts of IUTAM symposium. Liquid–Particles Interactions in Suspensions Flows, Grenoble–France, 18–22 Apr., 1994. – p.6j.
20. Zaripov Sh.Kh. Calculation of aerosol jet flows / Araslanov S.F., Kiselev O.M., Zaripov Sh.Kh. // J.Aerosol Science, 1996. – V.27, Suppl.1. – P.s607–s608.
21. Зарипов Ш.Х. Движение аэрозольных частиц в термодиффузионной камере / Баканов С.П., Ждимал В., Зарипов Ш.Х., Смолик И. // Аннотация доклада на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. – Пермь. – 23-29 августа 2001 г. – С.67.
22. Zaripov Sh.Kh. A mathematical model of an aerosol flow in the impactor with pit on the impaction surface / Holländer W., Maklakov D.V., Zaripov Sh.Kh. // J. of Aerosol Science, 2001. – V.33.Suppl.1. – P.545-546.
23. Zaripov S.K. Hydrodynamically interacting droplets at small Reynolds numbers / Holländer W., Zaripov S.K. // J. of Aerosol Science. - Abstracts of the European Aerosol Conference, Madrid, Spaine. – 2003. - V.1. - P.573-574.

24. Зарипов Ш.Х. Аспирация аэрозоля в сферический пробоотборник / Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х. // Тезисы VI – Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли”, Санкт–Петербург, 5–9 октября 2003. – С.102.
25. Zaripov S.K. A mathematical study of aerosol sampling by a spherical sampler in calm air / Galeev R.S., Zaripov S.K. // J. Aerosol Science. – Abstracts of the European Aerosol Conference, Madrid, Spaine. – 2003. — V.2. – P.1219–1220.