

На правах рукописи

Гильфанов Артур Камилевич

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРОБООТБОРНИКОВ

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань — 2009

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте математики и механики им. Н. Г. Чеботарева Казанского государственного университета им. В. И. Ульянова-Ленина.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Зарипов Шамиль Хузеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Мазо Александр Бенцианович

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Тукмаков Алексей Львович

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт меха-  
ники Московского государственного универ-  
ситета им. М. В. Ломоносова

Защита состоится 19 ноября 2009 г. в 15 ч. 50 мин. на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.081.21 при Казанском государственном университете  
им. В. И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская,  
18, корп. 2, ауд. 218.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н. И. Ло-  
бачевского Казанского государственного университета.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, прось-  
ба направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем  
за две недели до защиты.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Задворнов О.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Объект исследования и актуальность темы.** В современных условиях мониторинг воздушных дисперсных загрязнений - аэрозолей - является одной из важных экологических задач. К неотъемлемым элементам систем мониторинга относятся аэрозольные пробоотборники, предназначенные для измерения концентрации и дисперсности взвешенных частиц. В реальных условиях пробоотбора из движущегося газа в связи с проявлением инерционных свойств частиц их концентрация внутри прибора может отличаться от концентрации в изучаемом аэрозоле. Для количественной оценки и коррекции искажений, вносимых пробоотборником в измерения концентрации аэрозоля, вводится понятие коэффициента аспирации  $A$ , представляющего собой отношение средней концентрации в измерительном устройстве к счетной концентрации частиц в невозмущенной среде. Определение коэффициента аспирации для заданного способа отбора проб является задачей, имеющей большое практическое значение. В общем случае величина  $A$  зависит от характеристик самой частицы (размер, плотность, форма), свойств газового потока, геометрии пробоотборника (размер, форма), ориентации пробоотборника относительно направления ветра и направления силы тяжести. В настоящее время неисследованными или малоисследованными остаются задачи теории пробоотбора для расширенного диапазона отношения скоростей ветра и аспирации (аспирация из низкоскоростной и высокоскоростной среды). Для более полного понимания процесса аспирации важно знать не только изменение средней концентрации, но и пространственное распределение концентрации в окрестности и внутри пробоотборника. Поэтому актуальным является развитие математических моделей, позволяющих рассчитывать распределение концентрации аэрозольных частиц в задачах аспирации. Нерешенной является и задача нестационарной аспирации, представляющая интерес для моделирования дыхания человека.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является развитие нового подхода к исследованию задач аспирации аэрозоля, основанному на расчете распределения концентрации частиц вне и внутри пробоотборника, параметрические исследования характеристик тонкостенных пробоотбор-

ников в расширенном диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации, постановка и решение нестационарной аспирации.

В работе получены следующие **основные результаты**, выносимые на защиту:

1. Развита новый подход к исследованию задач аспирации аэрозоля в тонкостенные пробоотборники, основанный на расчете полей концентраций аэрозольных частиц вне и внутри пробоотборника. Рассчитаны поля концентраций для задачи аспирации аэрозоля из движущегося воздуха в щелевой и трубчатый пробоотборники при различных значениях числа Стокса и отношения скоростей ветра и аспирации. Проведено сравнение результатов расчетов на основе моделей потенциального и вязкого течений несущей среды, а также интегрального и локального коэффициентов аспирации. Исследовано влияние неоднородности распределения концентраций частиц в невозмущенном потоке аэрозоля на коэффициент аспирации.
2. Проведены параметрические исследования коэффициента аспирации для тонкостенной трубки при малых и больших значениях отношения скоростей ветра и аспирации. Изучено влияние силы тяжести.
3. Предложена приближенная формула для коэффициента аспирации, пригодная в области малых значений отношения скоростей ветра и скорости аспирации.
4. Дана постановка и решена задача нестационарной аспирации аэрозоля в тонкостенный пробоотборник. Получены зависимости коэффициента аспирации от времени.

**Достоверность результатов** обеспечиваются применением строгих математических моделей и методов при построении численных решений, удовлетворительным согласием полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

**Научная новизна.** Основные результаты диссертации являются новыми и состоят в развитии нового подхода к исследованию задач аспирации аэрозоля, основанному на расчете полей концентраций частиц, а также в

исследовании характеристик тонкостенных пробоотборников в расширенном диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации и при нестационарной аспирации.

**Практическая значимость.** Решение описанных задач и полученные результаты создают теоретическую основу для проведения аэрозольных измерений в расширенном диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации. Развитые модели и результаты исследований могут быть рекомендованы для использования научным лабораториям и природоохранным организациям, занимающимися мониторингом дисперсных воздушных загрязнений.

**Апробация работы.** Результаты, полученные в диссертации, докладывались на конференциях и семинарах: Молодежной школе-конференции «Лобачевские чтения» (Казань, 2005, 2007, 2008); Итоговой научно-образовательной конференции студентов КГУ (Казань, 2006); Восьмой международной Казанской летней научной школе-конференции «Теория функций, ее приложения и смежные вопросы» (Казань, 2007); Седьмом Всероссийском семинаре «Сеточные методы для краевых задач и приложения» (Казань, 2007); Международной научно-технической конференции «Энергетика-2008: инновации, решения, перспективы» (Казань, 2008); XXIII научной конференции стран СНГ «Дисперсные системы» (Одесса, 2008); Восьмой Международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (НПС-2008, Казань); итоговых научных конференциях КГУ (Казань, 2007, 2008); итоговой научной конференции Казанского научного центра Российской академии наук (Казань, 2009); Международной конференции «Современные проблемы математики, механики и их приложений», посвященной 70-летию ректора МГУ В.А. Садовниченко (Москва, 2009); Всероссийской научной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» (Казань, 2009); Европейской аэрозольной конференции ЕАС'2009 (Германия, Карлсруэ, 2009). Результаты работы в целом обсуждались на семинаре по механике многофазных сред под рук. А. Н. Осипцова (НИИ механики МГУ, Москва, 1 апреля 2009 г.).

**Публикации.** Основные результаты работы изложены в 14 научных

публикациях, из которых 5 статей и тезисы 9-ти докладов. Три статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК. В совместных работах автор лично проводил расчетные исследования, участвовал в постановке задач, обсуждении выводов и написании статей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 47 рисунков, 2 таблицы и 142 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 128 страниц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-01-00794, 07-07-00183, 09-01-09314-моб\_з), а также фонда содействия малых форм предприятия в научно-технической сфере при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (конкурсная программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») 2009 г.). Автор удостоен звания победителя республиканского конкурса молодых ученых РТ 2009 года в номинации «Премия». Автор выражает благодарность упомянутым фондам и организациям.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность и цель проводимых исследований. Дан обзор работ, посвященных экспериментальным исследованиям и математическому моделированию пробоотбора аэрозольных частиц. Изложено краткое содержание диссертации. Значительный вклад в теорию пробоотбора аэрозолей внесли Левин Л. М., Беляев С. П., Кустов В. Т., Волощук В. М., Гриншпун С. А., Липатов Г. Н., Медведев А. А., Суругин А. Г., Davies C. N., Vincent J. H., Dunnett S., Ingham D. B., Wen X., Willeke K. и др. Аэрозоли представляют собой двухфазную среду, в которой газ относится к несущей фазе, а аэрозольные частицы - к жидкой или твердой дисперсной фазе. В связи с невысокими концентрациями аэрозольных частиц в газе их влиянием на несущую среду и силами взаимодействия между частицами пренебрегается. Рассматриваемые в работе задачи относятся к случаю малых чисел Кнудсена  $Kn \ll 1$ , когда течение несущей среды вокруг частицы может быть описано в рамках гидродинамики сплошной среды.

В **первой главе** изложена общая математическая модель движения

аэрозольной частицы в неоднородном поле скоростей газа для задачи аспирации. В **разделе 1.1** описана постановка задачи пробоотбора аэрозоля в общем виде и дано определение коэффициента аспирации  $A$ . Уравнения, описывающие движение одиночной сферической частицы с постоянной массой в газовом потоке, в пренебрежении всеми силами, кроме силы аэродинамического сопротивления согласно закону Стокса и силы тяжести, записываются в виде (**раздел 1.2**)

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{(\bar{U} - \bar{V})}{\tau} + g\bar{G}, \quad \frac{d\bar{r}_p}{dt} = \bar{V} \quad (1)$$

где  $\bar{V}$  и  $\bar{U}$  - скорости частицы и газа соответственно,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\bar{G}$  - единичный вектор в направлении силы тяжести,  $\tau$  - время релаксации частицы ( $\tau = \rho_p \delta^2 / 18\mu$ ),  $\delta$  - диаметр частицы,  $\rho$  - плотность вещества частицы,  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости газа,  $\bar{r}_p$  - радиус-вектор координаты частицы. Для характеристики инерционных свойств частиц и учета влияния силы тяжести вводятся два безразмерных параметра: число Стокса  $St = \tau U_0 / L$  и  $v_s = V_s / U_0$ , где  $V_s = \tau g$  - стационарная скорость оседания частицы,  $U_0$  и  $L$  - характерные скорость и размер. В **разделе 1.3** описываются модели течения несущей среды. В приближении потенциальной модели осесимметричного течения методом граничных элементов решается краевая задача для функции тока, удовлетворяющей уравнению Лапласа в цилиндрических координатах. В приближении вязкого ламинарного течения газа поле скоростей несущей среды получается на основе решения уравнений Навье-Стокса с помощью метода конечных объемов в среде CFD программы Fluent. В **разделе 1.4** представлен лагранжев метод расчета концентрации частиц, развитый в работах Осипцова А.Н. В случае, когда течение описывается декартовыми координатами  $(x, y, z)$ , уравнение неразрывности частиц в лагранжевых координатах в безразмерной форме имеет вид:

$$c_p(x_0, y_0, z_0, t) \det \|J_{ij}\| = c_{p0}(x_0, y_0, z_0, 0), \quad J_{ij} = \partial x_i / \partial x_{0j} \quad (2)$$

где  $c_p$  - концентрация частиц,  $x_0, y_0, z_0$  - начальные значения координаты частицы,  $t$  - время,  $J_{ij} = \partial x_i / \partial x_{0j}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ;  $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ ) - компоненты якобиана перехода от лагранжевых координат к эйлеро-

вым. Уравнения для определения  $J_{ij}$  выводятся путем дифференцирования уравнений (1) по лагранжевым координатам  $x_{0j}$

$$\frac{\partial J_{ij}}{\partial t} = \Omega_{ij}, \quad \frac{\partial \Omega_{ij}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_{j0}} \left( \frac{U_i - V_i}{\tau} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{\partial v_{si}}{\partial x_{0j}} \quad (3)$$

На выбранной траектории уравнения (1), (3) составляют замкнутую систему обыкновенных дифференциальных уравнений для расчета скорости, координаты частицы и компонент якобиана. Концентрация частиц вдоль рассчитываемой траектории вычисляется из уравнения неразрывности (2).

**Глава 2** посвящена задаче аспирации аэрозоля из движущегося воздуха в тонкостенный щелевой пробоотборник. В **разделе 2.1** дана постановка задачи аспирации аэрозоля из движущегося газа в щель, образованную двумя полубесконечными пластинами. Скорость аспирации  $U_a$  (средняя скорость во входном отверстии) направлена вдоль оси  $X$ , скорость газа  $U_0$  вдали от пробоотборника постоянна.  $R_a = U_0/U_a$  - отношение скоростей. При моделировании течения несущей среды использовано приближение вязкого течения несжимаемой жидкости. В **разделе 2.2** приведены результаты расчетов. Для промежуточных чисел Стокса при  $R_a < 1$  концентрация частиц увеличивается с расстоянием от оси симметрии до некоторого значения  $y$ , затем наблюдается падение  $c_p$  (рис. 1а). Внутри пробоотборника концентрация частиц может уменьшаться до значений меньше начальной концентрации. Такое поведение обусловлено неоднородным пространственным распределением скорости газа и сложным характером траекторий в этом поле скоростей. Неоднородность распределения концентрации внутри пробоотборника может быть высокой. Для расходящегося течения ( $R_a > 1$ ) концентрация частиц монотонно растет к стенке (рис. 1б). На рис. 1а приведены также функции  $c_p(y)$ , рассчитанные приближенным способом из условия баланса потока частиц в пределах области, ограниченной двумя близкими траекториями.

**Глава 3** посвящена задаче аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку. В **разделе 3.1** дана постановка задачи для случая движущегося газа. В связи с осевой симметрией течения рассмотрена только верхняя половина меридиональной плоскости ( $X, R$ ). В случае модели осесимметричного потенциального течения несжимаемой жидкости введем функцию тока



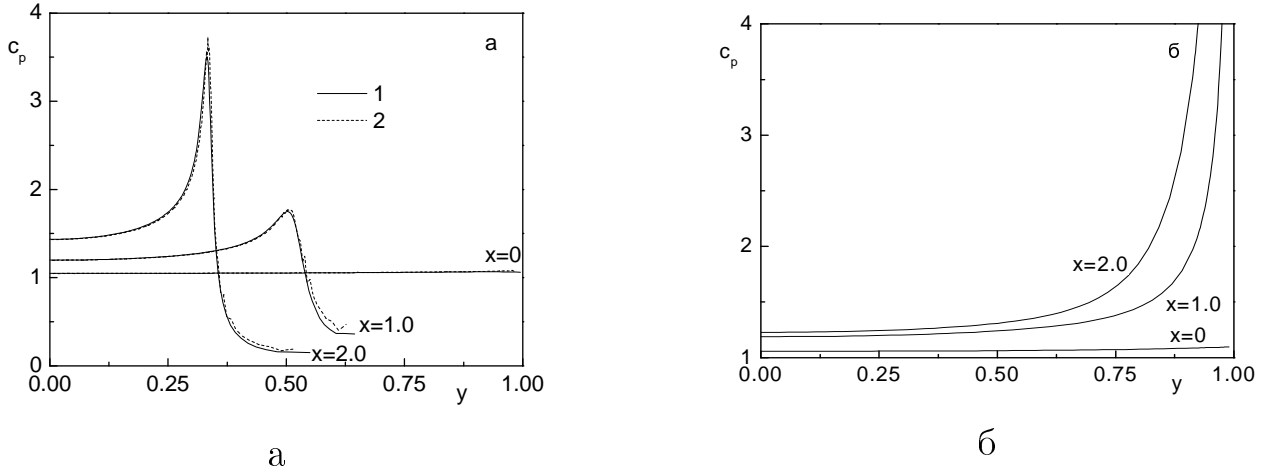


Рис. 1. Распределение концентрации частиц в нескольких сечениях пробоотборника при  $Ra = 0.5$  (а) и  $Ra = 3$  (б) для  $St = 1$ : 1 - метод Осипцова, 2 - приближенный метод.

$\psi_p(x, r)$ , удовлетворяющую уравнению

$$\frac{\partial^2 \psi_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_p}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_p}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

Функция  $\psi_p(x, r)$  ищется в виде суммы двух функций

$$\psi_p(x, r) = \frac{1}{2} Ra r^2 + (1 - Ra) \psi_s(x, r) \quad (5)$$

где  $\psi_s(x, r)$  - функция тока течения, создаваемого аспирацией газа из неподвижной среды вдали от трубки при единичной скорости внутри трубки на значительном удалении от входного отверстия. Функция  $\psi_s(x, r)$  удовлетворяет уравнению (4) и граничным условиям

$$\psi_s(x, 0) = 0, \quad -\infty < x < +\infty \quad (6)$$

$$\psi_s(x, 1) = \frac{1}{2}, \quad 0 < x < +\infty \quad (7)$$

Течение газа, определяемое функцией  $\psi_s(x, r)$ , формируется распределенными кольцевыми вихрями интенсивности  $\gamma(\xi)$  на поверхности трубки ( $\xi$  - абсцисса положения кольца). В этом случае функция  $\psi_s(x, r)$  может быть выражена в виде

$$\psi_s(x, r) = \frac{\sqrt{r}}{2\pi} \int_0^\infty \gamma(\xi) G(x - \xi, r) d\xi \quad (8)$$

где  $G(x, r) = (2/k - k)K(k) - 2E(k)/k$ ,  $k = 2\sqrt{r/[x^2 + (r + 1)^2]}$ ,  $K(k)$  и  $E(k)$  - эллиптические интегралы первого и второго порядка, которые нами находятся численно. Из условия (7) получается интегральное уравнение для определения  $\gamma(\xi)$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \gamma(\xi) G(x - \xi, 1) d\xi = \frac{1}{2} \quad (9)$$

Уравнение (9) решается численно методом граничных элементов. В **разделе 3.2** приведены результаты исследования полей концентрации частиц и исследования влияния неоднородности профиля концентрации частиц в невозмущенной среде на коэффициент аспирации. Вдали от пробоотборника концентрация частиц принята постоянной и равной единице. Обе модели течения дают близкие распределения концентраций вне трубки (рис. 2). В целом концентрация частиц растет по мере приближения к пробоотборнику. Вместе с тем расчеты в приближении вязкого газа обнаруживают внутри пробоотборника зоны с концентрацией меньше единицы, то есть меньше начальной концентрации.

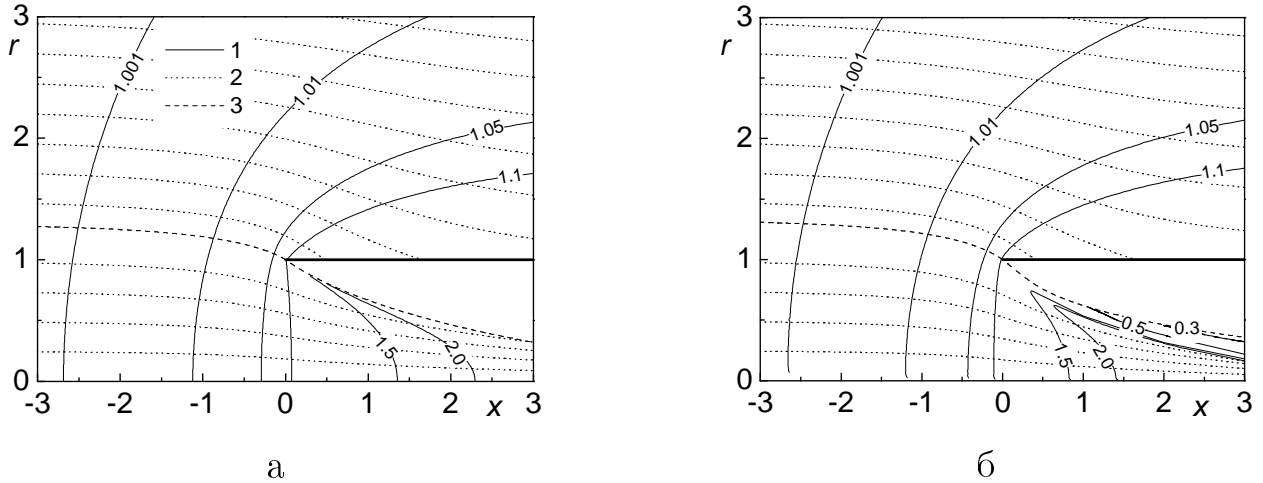


Рис. 2. Траектории частиц (кривые 2) и изолинии концентраций (кривые 1) при  $R_a = 0.2$  и  $St = 1$  (а - потенциальная модель, б - вязкая модель). Кривые 3 - предельные траектории.

Коэффициент аспирации обычно вычисляется методом предельных траекторий. Знание концентрации и скорости частиц во входном сечении

пробоотборника позволяет рассчитать коэффициент аспирации по формуле

$$A = 2\pi \int_0^{R_t} c_p(0, R) V_x(0, R) R dR / Q \quad (10)$$

где  $Q = \pi R_t^2 U_a$  - расход воздуха через трубку. Рассчитывался также локальный коэффициент аспирации по формуле

$$A_\delta = c_p(0, 0) V_x(0, 0) / U_a \quad (11)$$

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента аспирации от  $R_a$ , рассчитанные методом предельных траекторий, и зависимость  $A_\delta(R_a)$ , полученная по формуле (11). Кривая зависимости  $A(R_a)$ , найденная в рамках модели вязкого течения, немного выше соответствующей кривой, полученной с помощью модели потенциального течения. Особенно заметно это различие проявляется при меньших числах Стокса. Сравнение интегрального и локального коэффициентов аспирации (рис. 3б) также обнаруживает наибольшее различие при меньших числах Стокса. В **разделе 3.3** приведе-

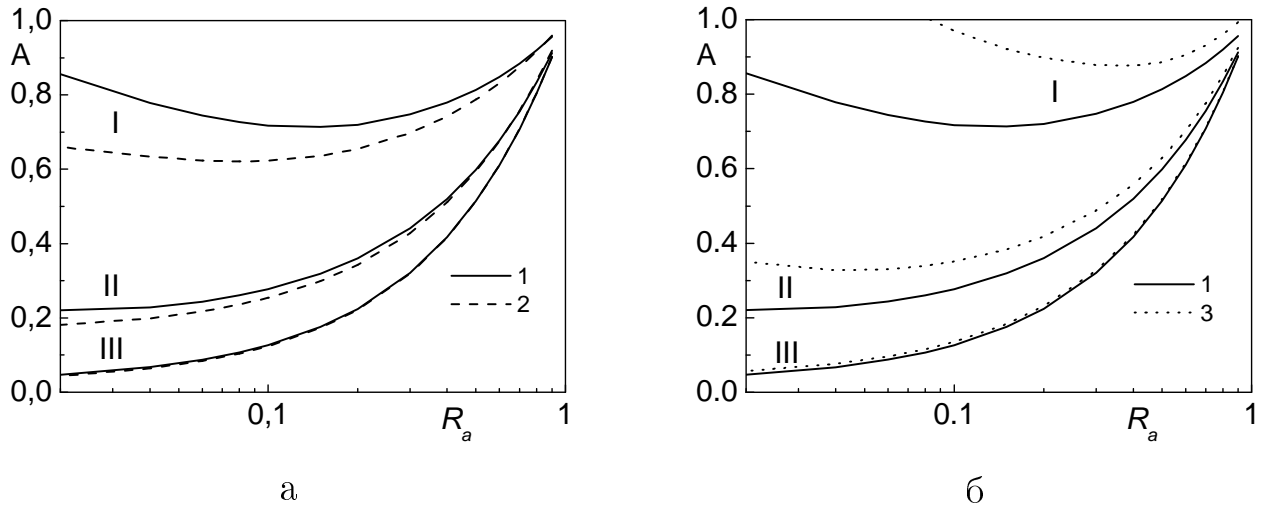


Рис. 3. Зависимость коэффициента аспирации  $A$  от  $R_a$ : кривые 1 и 2 модели вязкого и потенциального течения, кривые 3 -  $A_\delta$  для модели вязкого течения: I-III -  $St=0.1; 1; 10$ .

ны результаты исследования коэффициента аспирации аэрозоля в трубку из низкоскоростного потока, то есть в области малых значений параметра  $R_a$ . Вычисляются два типа коэффициента аспирации: без учета отскока  $A_i$

и с возможным отскоком частиц от внешней стенки трубки  $A_e$  (вторичная аспирация). Численные результаты показывают увеличение  $A_i(R_a)$  и  $A_e(R_a)$  в области малого  $R_a$  так же, как и эксперименты (рис. 4). Видно, что зависимости  $A_i(R_a)$  и  $A_e(R_a)$  мало отличаются друг от друга для  $St_a = St/R_a = 0.625$ , то есть влияние вторичной аспирации незначительно. В этом случае обе расчетные кривые  $A_i(R_a)$  и  $A_e(R_a)$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. При большем числе Стокса  $St_a = 2.935$  влияние вторичной аспирации возрастает, и ближе к экспериментальным значениям коэффициента аспирации оказывается расчетная кривая  $A_e(R_a)$ .

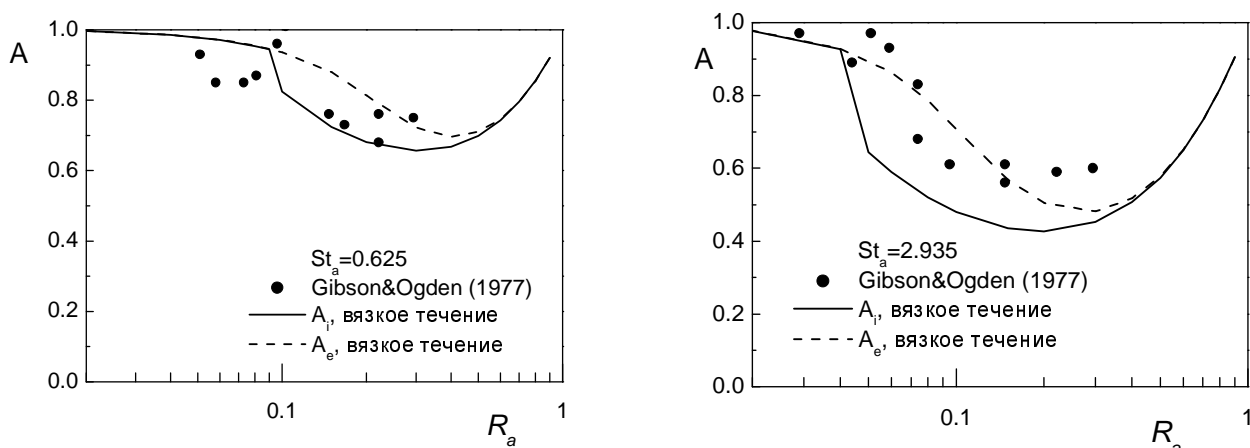


Рис. 4. Сравнение зависимостей  $A_i(R_a)$  и  $A_e(R_a)$  с экспериментальными данными из работы Gibson&Ogden (1977).

Проведены также исследования для горизонтально ориентированной трубки с учетом силы тяжести. В этом случае решалась трехмерная задача для траекторий частиц, поле течения несущей среды рассчитывалось в приближении потенциального течения. Области захвата частиц вдали от пробоотборника при  $St_a = 1$  и  $v_s = 0.1$  с уменьшением параметра  $R_a$  (рис. 5) показаны в плоскостях, перпендикулярных вектору начальной скорости частиц. С уменьшением  $R_a$  начинает сказываться влияние силы тяжести, первоначально круговая область захвата ( $R_a = 0.2$ ) меняет свою форму. Появляется узкая область вокруг основного круга ( $R_a = 0.1$ ), которая затем соединяется с ним ( $R_a = 0.08$ ). Картина траекторий частиц, иллюстрирующая механизм образования дополнительной области захвата, показана на рис. 6. Далее область захвата расширяется, при этом внутри

нее растет область, с которой стартуют частицы, оседающие на поверхности трубки ( $R_a = 0.04$ ). Площади полученных областей захвата  $S_p$  используются для расчета коэффициента аспирации по формуле

$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} \quad (12)$$

где  $U_1 = \sqrt{U_0^2 + V_s^2}$  - скорость частиц.

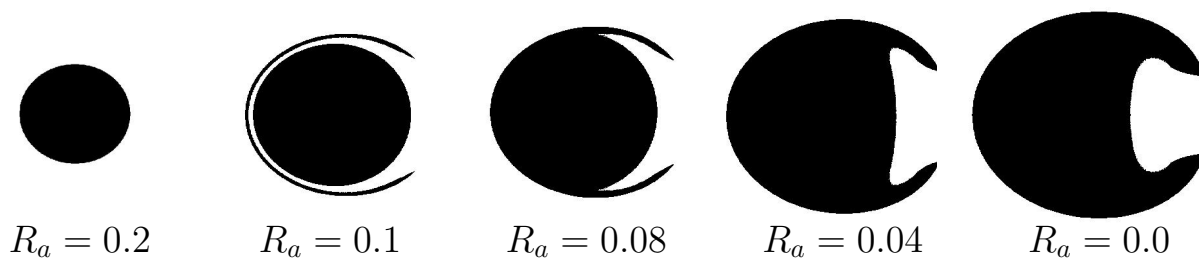


Рис. 5. Области захвата в поперечном сечении для различных  $R_a$ .

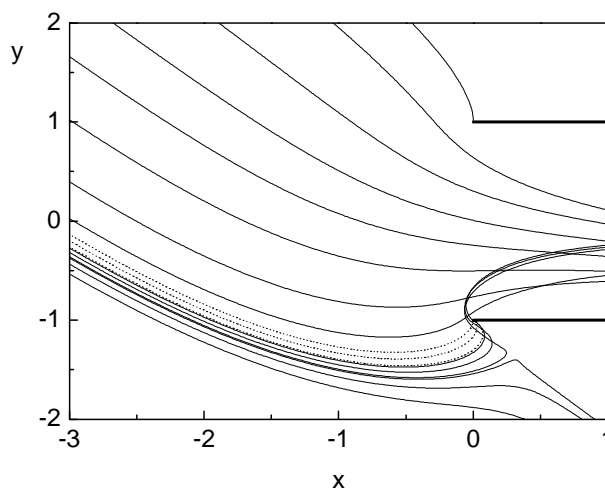


Рис. 6. Траектории частиц при  $St_a = 1$  и  $R_a = 0.1$ . Пунктирные линии - траектории, попадающие на стенку.

На рис. 7а даны зависимости  $A_i(R_a)$ , рассчитанные с учетом силы тяжести при  $St_a = 0.1, 1, 10$  и  $v_s = 0.01, 0.1, 1$  соответственно и без учета силы тяжести. При  $v_s > R_a$  начинает сказываться влияние силы тяжести. Для рассматриваемой задачи - аспирации из движущегося воздуха в трубку, горизонтально ориентированную в пространстве, - коэффициент аспирации уменьшается при учете силы тяжести. При уменьшении  $R_a$  коэффициент аспирации стремится к значению, соответствующему пробоотбору

из неподвижного воздуха. Численные результаты  $R_a = 0$  хорошо согласуются с данными, полученными по полуэмпирической формуле из работы Su&Vincent (2004). Общая формула коэффициента аспирации, пригодная во всем диапазоне  $R_a \in [0, 1]$ , может быть представлена в форме кусочно-заданной функции

$$A = \begin{cases} A_0 + R_a(A_{mc} - A_0)/v_s, & R_a < v_s \\ A = A_m, & R_a > v_s \end{cases} \quad (13)$$

где  $A_0$ ,  $A_m$ - коэффициенты аспирации для случаев неподвижного и движущегося воздуха (Su&Vincent, 2004, Медведев, 2002),  $A_{mc} = A_m(v_s)$ . Как видно из рис. 7б, наблюдается удовлетворительное согласие между численными результатами и предложенной формулой (13). В разделе 3.4 приве-

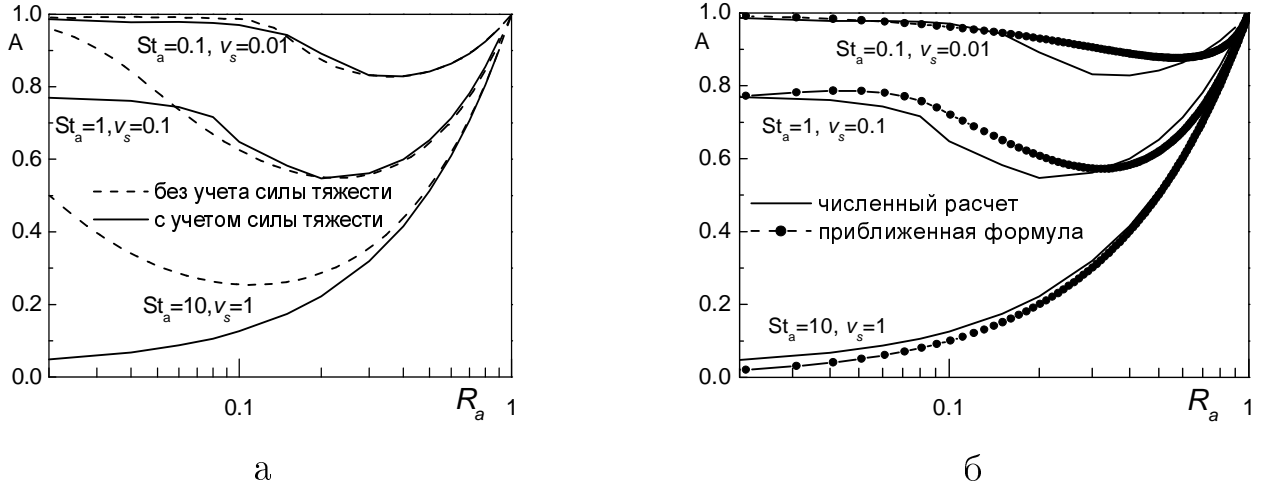


Рис. 7. Сравнение численных результатов и зависимостей, полученных по формуле (13).

дены результаты исследования коэффициента аспирации в случае пробоотбора аэрозоля в трубку из высокоскоростного потока, то есть в области при  $R_a \gg 1$ . Такая ситуация реализуется при высоких скоростях ветра (пробоотбор в атмосфере) или низких значениях скорости аспирации. Расчетные результаты, полученные в рамках двух моделей течений, близки друг к другу, то есть учет вязкости не приводит к заметному уточнению значений коэффициента аспирации. Наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Отметим, что в большинстве работ по аспирации ограничивались случаем стационарного пробоотбора. Одной из целей исследования concentra-

ций частиц с помощью пробоотборников является предсказание массовой доли дисперсных загрязнений, вдыхаемой человеком. Вместе с тем, пробоотборники работают в стационарном режиме, а процесс дыхания человека является нестационарным и периодическим. Кроме того, возможны ситуации аэрозольных измерений, когда исследуемый аэрозоль характеризуется заметными временными изменениями. Таким образом, существует круг проблем, когда следует рассматривать задачу нестационарной аспирации. Одним из преимуществ развитого в предыдущих главах подхода к расчету концентраций частиц является возможность рассмотрения таких нестационарных задач. В **Главе 4** формулируется и решается задача об аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку, работающую в периодическом режиме, имитирующем дыхание человека. Получены зависимости коэффициента аспирации от времени для периода вдоха. Проанализировано поведение аэрозольных частиц, стартующие в различные моменты времени относительно времени периода дыхания.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ**

Развиты математические модели расчета распределения концентрации частиц при аспирации аэрозоля из движущегося воздуха в щелевой пробоотборник и тонкостенную трубку. Поле течения несущей среды описывается в рамках потенциальной и вязкой моделей несжимаемой жидкости. Численная реализация моделей основана на методе граничных элементов и методе конечных объемов. Уравнения движения частиц дополняются уравнениями для определения концентраций, которые описывают изменение компонент якобиана преобразования лагранжевых координат в эйлеровы вдоль траекторий.

Проведены параметрические исследования коэффициента аспирации и распределений концентрации частиц. Показано, что при промежуточных числах Стокса наблюдается значительная неоднородность распределения концентрации в окрестности и внутри пробоотборника. В целом концентрация частиц растет при приближении к пробоотборнику, но при определенных числах Стокса появляются области с концентрацией меньше концентрации частиц в невозмущенном потоке.

Показано, что при небольших отклонениях отношения скоростей вет-

ра и аспирации от единицы коэффициент аспирации может быть найден с удовлетворительной точностью на основе вычисления локального коэффициента аспирации, учитывающего изменения параметров течения несущей среды и частиц только вдоль оси симметрии.

Исследовано влияние крупномасштабных неоднородностей профиля концентрации частиц в невозмущенном потоке аэрозоля. Значительное влияние неоднородностей на коэффициент аспирации проявляется при малых отношениях скоростей ветра и аспирации и больших числах Стокса.

Численно исследован коэффициент аспирации тонкостенной трубки при малых значениях отношения скоростей ветра и аспирации для моделей вязкого и потенциального течения несжимаемой жидкости. Показано, что в этой области и при малых числах Стокса проявляется наибольшее различие коэффициента аспирации, рассчитанного для двух моделей. Проведено сравнение расчетных результатов по развитым моделям с известными приближенными формулами различных авторов.

Исследовано влияние силы тяжести при различных значениях отношения скорости ветра и аспирации и различных числах Стокса и безразмерной стационарной скорости оседания. В исследуемом случае горизонтального положения трубки гравитационная сила уменьшает коэффициент аспирации. Построена формула для коэффициента аспирации, представляющая собой линейную комбинацию формул для неподвижной и движущейся среды, и пригодная в диапазоне отношения скоростей ветра и аспирации, меньшей единицы.

Даны постановка и решение задачи нестационарной аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку, когда скорость аспирации задается периодической функцией времени, соответствующей дыханию человека. Получены зависимости коэффициента аспирации от времени для периода вдоха. Проанализировано поведение аэрозольных частиц, стартующих в различные моменты времени относительно времени периода дыхания

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. *Гильфанов А.К.* Расчет концентраций аэрозольных частиц при обтекании цилиндра и сферы // Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Т.31. Материалы Четвертой



- молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения - 2005».— Казань: Изд-во Казанского математического общества, 2005.— С. 42 - 44.
2. *Гильфанов А.К.* Моделирование пробоотбора аэрозольных частиц из движущегося газа в щелевой пробоотборник // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского государственного университета 2006 года: Сборник тезисов.— Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2006.— С. 53 - 54.
  3. *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х.* Определение полей концентрации аэрозольных частиц в задаче об аспирации из движущегося газа // Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Т.35. Материалы Восьмой международной Казанской летней научной школы-конференции «Теория функций, ее приложения и смежные вопросы».— Казань: Изд-во Казанского математического общества, Изд-во Казанского гос. ун-та, 2007.— С. 72 - 74.
  4. *Гильфанов А.К.* Исследование поля концентрации аэрозольных частиц при аспирации в движущемся воздухе // Сеточные методы для краевых задач и приложения. Материалы Седьмого Всероссийского семинара.— Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2007.— С. 76 - 80.
  5. *Гильфанов А.К.* Расчет коэффициента аспирации аэрозольных частиц для тонкостенной трубки // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Энергетика-2008: инновации, решения, перспективы».— Кн. 1 «Теплоэнергетика».— Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008.— С. 57 - 60.
  6. *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Маклаков Д.В.* Расчет распределения концентраций частиц для задачи пробоотбора аэрозоля // Дисперсные системы: XXIII научная конференция стран СНГ, 22-26 сент. 2008 г., Одесса, Украина: материалы конференции.— Одесса: Астропринт, 2008.— С. 78 - 79.
  7. *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х.* Определение поля концентрации частиц в задаче аспирации аэрозоля в движущемся воздухе // Известия РАН. Механика жидкости и газа.— 2008.— № 4.— С. 71 - 81.
  8. *Гильфанов А.К.* Расчет характеристик аэрозольного пробоотборника в низко- и высокоскоростном потоках // Труды Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Т.37. Материалы Седьмой молодежной школы-конференции «Лобачевские чтения - 2008».— Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008.— С. 36 - 38.

9. *Гильфанов А.К.* Расчет характеристик тонкостенного пробоотборника при больших значениях отношения скоростей ветра и аспирации // Ученые записки Казанского государственного университета.— 2008.— Кн. 4.— С. 98 - 105.
10. *Гильфанов А.К., Зарипов Т.Ш.* Возможности параллельных вычислений при решении задач газовой динамики в среде CFD программы FLUENT // Известия вузов. Авиационная техника.— 2009.— № 1.— С. 40 - 44.
11. *Гильфанов А.К.* Численное исследование аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку в низкоскоростном потоке // Современные проблемы математики, механики и их приложений. Материалы международной конференции, посвященной 70-летию ректора МГУ В.А. Садовниченко.— М.: Издательство «Университетская книга», 2009.— С. 135 - 136.
12. *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Маклаков Д.В.* Характеристики тонкостенного пробоотборника в низкоскоростном потоке // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований. Том III: Моделирование в охране окружающей среды. Общая экология и охрана биоразнообразия.— Казань.: Издательство «Бриг», 2009.— С. 29 - 32.
13. *Gilfanov A.K., Maklakov D.V., Zaripov S.K.* Calculating particle concentration fields for steady and unsteady aerosol sampling. Abstracts of the European Aerosol Conference.— Karlsruhe, Germany, 2009.— T150A13.
14. *Zaripov S.K., Gilfanov A.K., Maklakov D.V.* Numerical study of thin-walled sampler performance for aerosols in low windspeed environments. Abstracts of the European Aerosol Conference.— Karlsruhe, Germany, 2009.— T150A14.