

УДК 532.529.5

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ПРОБООТБОРА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Ш.Х. Зарипов, Р.С. Галеев, Э.В. Скворцов, М.В. Ванюнина

Аннотация

Дается обзор исследований авторов по задачам теории пробоотбора аэрозольных частиц. Решены задачи аспирации аэрозоля из движущегося и неподвижного газа в щелевой и цилиндрической пробоотборники, а также в круглую тонкостенную трубку и в трубку, расположенную на цилиндрическом теле. Развита математическая модель аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник из неподвижного воздуха. Проведен анализ особых точек уравнений движения частиц в окрестности сферы с аспирацией. Проведены численные исследования коэффициента аспирации как функции размера частиц, отношения скоростей ветра и аспирации, скорости седиментации, угла отклонения оси пробоотборника от направления набегающего газового потока и направления силы тяжести.

Аэрозоли в настоящее время являются объектом растущего внимания специалистов из различных областей знания (механики, химии, экологии 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). Обеспечение чистоты воздуха, постоянно вдыхаемого человеком, следует отнести к одной из наиболее важных современных экологических проблем. Изучение реальных аэрозолей базируется на измерении концентраций и дисперсности аэрозольных частиц. В связи с этим интенсивно развиваются как прямые, так и косвенные (оптические) методы исследования воздушной среды, совершенствуются существующие методы очистки воздуха от дисперсных загрязнений. Прямые методы исследования аэрозолей предполагают непосредственный отбор аэрозольных частиц в измерительное устройство. При этом в реальных условиях пробоотбора из движущейся или неподвижной воздушной 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. Определение коэффициента аспирации для заданного способа отбора проб имеет большое практическое значение и представляет собой ос-

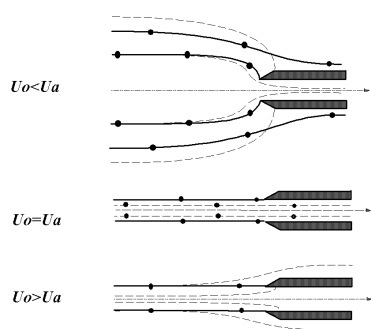


Рис. 1. Схема аспирации при различных отношениях скоростей ветра и аспирации

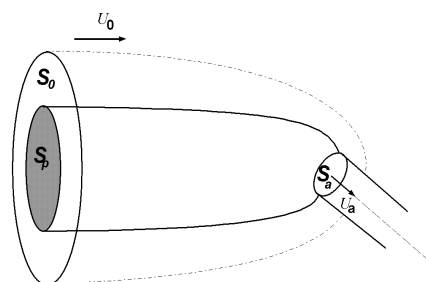


Рис. 2. Трубка предельных траекторий при аспирации в трубку из движущегося воздуха

новную задачу теории пробоотбора аэрозольных частиц. 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.

Важным параметром, оказывающим решающее влияние на коэффициент аспирации в движущемся воздухе, является отношение скорости ветра U_0 к скорости аспирации U_a (осредненная скорость во входном сечении пробоотборной трубки): $a = U_0/U_a$. Измеренная концентрация аэрозоля может быть как меньше, так и больше концентрации исследуемого аэрозоля, т. е. коэффициент аспирации отклоняется от единицы в меньшую или большую стороны. На рис. 1 изображены линии тока газа и траектории частиц при аспирации в круглую трубку, расположенную соосно направлению ветра и отверстием к потоку, для трех случаев, характеризуемых различными значениями отношения скоростей ветра и аспирации a . Для тонкостенной трубки в случае так называемого изокINETического отбора ($U_0 = U_a$) линии тока газа почти прямолинейны, а траектории частиц не отклоняются от них, следовательно, не меняется и концентрация частиц, и коэффициент аспирации A равен единице. В случае превышения скорости аспирации над скоростью ветра ($U_0 < U_a$) засасывается воздух из окружающего пространства большего объема, чем объем цилиндрической области с сечением, равным сечению трубки. При этом часть движущихся в потоке аспирируемого газа частиц в силу влияния инерции могут не попасть в трубку. Это приводит к недобору аэрозольных частиц, т. е. $A < 1$. В случае, когда скорость ветра выше скорости аспирации, область засасываемого воздуха меньше соответствующей области с сечением трубки. Поэтому в трубку могут попасть частицы из зоны за пределами аспирируемого воздуха, и коэффициент аспирации будет превышать единицу.

Другой причиной изменения концентрации частиц может быть отклонение оси аспирирующей трубки от направления набегающего потока. В этом случае, как правило, наблюдается недобор аэрозольных частиц. Большое влияние на коэффициент аспирации при некоторых условиях может оказывать сила тяже-

сти. Отметим также влияние процесса вторичной аспирации (учет отскока частиц от внешних стенок). В аэрозольных измерениях наряду с тонкостенными используются и пробоотборники с затупленной головной частью, коэффициент аспирации которых заметно отличается от коэффициента аспирации тонкостенных пробоотборников, т. е. эффективность аспирации зависит в значительной степени от формы пробоотборника.

Следуя работе [1], опишем общую постановку задачи аспирации для произвольного пробоотборника, ориентированного под произвольным углом к направлению ветрового потока. Пусть $N_0(t)$ – число частиц данного размера, проходящих в единицу времени через площадь S_0 , перпендикулярную направлению скорости частиц в невозмущенном потоке аэрозоля и ограниченную трубкой разделительных линий тока (рис. 2). Эта трубка отделяет область аспирируемого газа. Обозначим через $N_a(t + \Delta t)$ часть тех же частиц, попадающих в пробоотборник через входное отверстие площади S_a , Δt – среднее время движения частиц от плоскости S_0 до плоскости S_a . Тогда коэффициент аспирации может быть определен как $A(t) = N_a(t + \Delta t) / N_0(t)$. Не все частицы из области S_0 попадут во входное отверстие в связи с влиянием инерционных и гравитационных сил. Траектории аспирируемых частиц находятся внутри трубки предельных траекторий с поперечным сечением площади S_p в области невозмущенного потока вдали от пробоотборника. Записывая поток частиц через интеграл по площади от произведения концентрации частиц на скорость, представим коэффициент аспирации в виде

$$A(t) = \frac{\int_{S_a} c_a(x, y, t + \langle \Delta t \rangle) v_{pa}(x, y, t + \langle \Delta t \rangle) dy dx}{\int_{S_0} c_0(x, y, t) v_{p0}(x, y, t) dy dx}, \quad (1)$$

где v_{pa} и c_a – скорость и концентрация частицы в плоскости входного сечения пробоотборника, v_{p0} и c_0 – те же величины в плоскости S_0 . Уравнение (1) с учетом условия баланса потока частиц в пределах трубки предельных траекторий можно переписать в виде

$$A(t) = \frac{\int_{S_p} c_p(x, y, t) v_{pp}(x, y, t) dy dx}{\int_{S_0} c_0(x, y, t) v_{p0}(x, y, t) dy dx}, \quad (2)$$

где v_{pp} и c_p – скорость и концентрация частицы в плоскости S_p . В предположении о пространственной однородности концентрации и скорости частиц в пределах площади S_0 ($c_p(x, y, t) = c_0(x, y, t)$, $v_{pp}(x, y, t) = v_{p0}(x, y, t)$ для $(x, y) \in S_0$) из (2) получим

$$A(t) = S_p / S_0. \quad (3)$$

Как правило, в теории пробоотбора рассматриваются задачи аспирации из стационарного потока ($U_0 = \text{const}$). В настоящей работе, как и в большинстве других теоретических работ, вычисление коэффициента аспирации осуществляется по формуле (3), где A считается не зависящим от времени. Таким образом, задача вычисления коэффициента аспирации сводится к определению площади S_p .

Традиционная механика аэрозолей характеризуется пренебрежением обратного влияния частиц на газовую среду, что оправдано для большинства реальных аэрозолей в связи с невысокими концентрациями частиц в них. Кроме того, обычно пренебрегается силами взаимодействия между частицами. Задача моделирования течения аэрозоля разбивается на две: определение поля скоростей течения газа и расчета траекторий частиц в найденном поле. Уравнения движения частиц представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно составляющих скорости частиц и ее координат. Решение задачи Коши для этой системы с соответствующими начальными условиями позволяет рассчитать траекторию отдельной частицы. Инерционные свойства частиц характеризуются параметром $\tau = \rho_p \delta^2 / 18\mu$ – временем релаксации сферической частицы (ρ_p – плотность частицы, δ – диаметр частицы, μ – коэффициент динамической вязкости газа). Для учета инерционных свойств частиц и силы тяжести вводятся два безразмерных параметра: число Стокса $St = \tau U_0 / L$ и $v_s = V_s / U_0$ ($V_s = \tau g$ – скорость стационарного оседания частицы).

Значительный вклад в исследование задачи аспирации аэрозолей внесли Л.М. Левин, С.П. Беляев, В.Т. Кустов, В.М. Волощук, С.А. Гриншпун, Г.Н. Липатов, А.А. Медведев, А.Г. Суругин, С.N. Davies, J.H. Vincent, S. Dunnet, D.B. Ingham, X. Wen, K. Willeke и др. Обзор экспериментальных и теоретических работ по определению коэффициента аспирации приводится в книге [2]. Математические методы расчета коэффициента аспирации приведены в монографиях [3–5]. Несмотря на давнюю историю исследований аспирации аэрозоля, мало изучен 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 некоторые из указанных проблем рассматриваются в работах, обзор которых приводится ниже.

В [6–7] рассмотрены плоские задачи аспирации аэрозоля для случая шелевого пробоотборника в рамках модели потенциального течения несжимаемой жидкости. Удобство использования моделей плоского 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 требуется решать

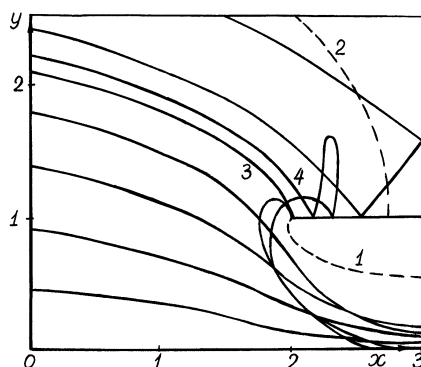


Рис. 3. Траектории частиц для случая $St = 1$, $a = 0.19$. Штриховые кривые 1 и 2 – свободная поверхность и разделительная линия тока. Кривые 3, 4 – предельные траектории без учета и с учетом отскока

трансцендентное уравнение, дающее связь координат физической плоскости и координат параметрической плоскости, где записывается аналитическое решение. В [8] предложен 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. В [6] дается постановка задачи об аспирации аэрозоля в щель, образованную двумя полубесконечными параллельными пластинами. 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 параметра a . Исследовано влияние «вторичной аспирации», т. е. отскока частиц от внешней стенки щели (рис. 3). Теоретически показано немонотонное поведение коэффициента аспирации в области малых значений отношения скорости потока к скорости аспирации (рис. 4). Работа [7] посвящена задаче об аспирации аэрозоля в щелевой пробоотборник в рамках модели безотрывного течения. Предложена математическая модель аспирации аэрозоля в щелевой пробоотборник при двух углах расположения щели относительно направления ветрового потока: 0 и π . На бесконечности вдаль 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. 4). 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

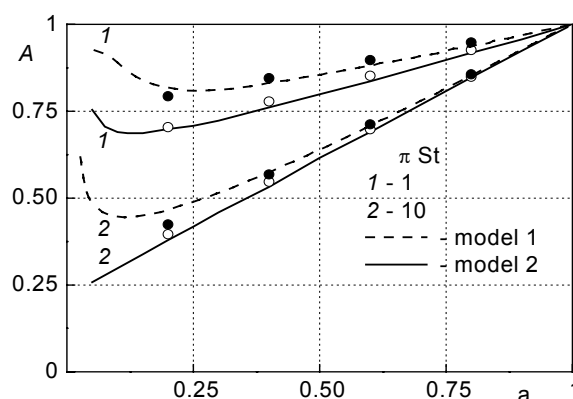


Рис. 4. Зависимость коэффициента аспирации A от параметра a , рассчитанного в рамках моделей отрывного (model 1) и безотрывного обтекания (model 2). Кружки – значения по приближенной формуле из работы [4]

скоростей ветра и аспирации верхней границы размера частиц, улавливаемых пробоотборником при противоположном направлении скорости аспирации и скорости набегающего потока. В работе [9] построена модель аспирации аэрозоля в щелевой пробоотборник 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. 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.

В [10] 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 седимен-

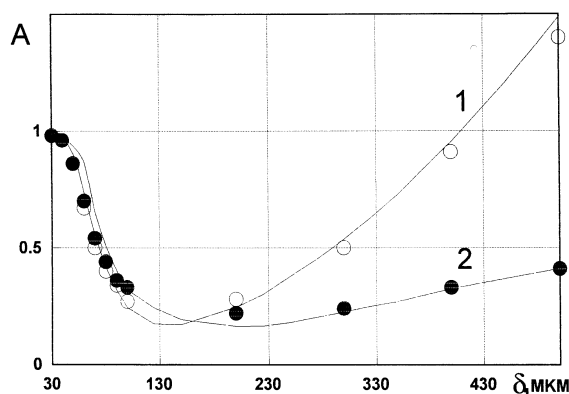


Рис. 5. Зависимость коэффициента аспирации A от диаметра частицы δ (кривая 2 соответствует стоксову сопротивлению, $U_a = 5$ м/с, радиус трубки $R_0 = 0.5$ см). Кружки: данные из работы [11]

тации. 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. 5, где приведена зависимость коэффициента аспирации от диаметра частицы. Модель с использованием стоксового сопротивления предсказывает заниженные значения коэффициента для частиц больших размеров.

В последнее время заметно возрос интерес к исследованию персональных пробоотборников, применяемых для анализа загрязненности воздушной среды в производственных помещениях. Персональные пробоотборники устанавливаются на груди рабочего, и по окончании работы анализ пыли, собранной пробоотборником, позволяет рассчитать уровень запыленности помещения. Основное внимание при их изучении уделяется анализу влияния тела человека на процесс аспирации. В [12–13] 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 CFD программа ANSYS/Flotran. Уравнения движения частиц в найденном поле скоростей газа решаются численно методом Рунге – Кутты, 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 пробоотборников с затупленной головной частью. Эффективность

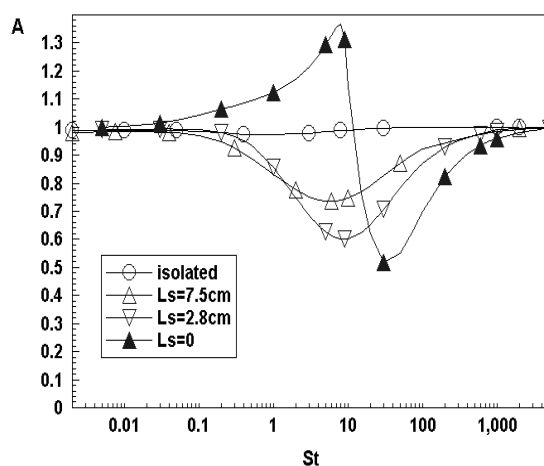


Рис. 6. Зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса при $U_0 = U_a = 0.5$ м/с (L_s – длина трубки)

аспирации может оказываться отличной от единицы, в том числе и для изокINETического случая при равных скоростях ветра и аспирации (см. рис. 6).

Наряду с тонкостенными в аэрозольных измерениях активно используются цилиндрический и сферический пробоотборники. Интерес к ним обусловлен схожестью поведения аэрозольных частиц вокруг головы человека в процессе дыхания с поведением частиц при аспирации в цилиндрический или сферический пробоотборники. Знание основных закономерностей динамики частиц при аспирации дает важную информацию для анализа попадания пылевых частиц в легкие человека. В [14] 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. 7, h – относительная ширина входной щели).

В [15] предложен новый подход к определению предельных траекторий в задачах механики аэрозолей, основанный на формулировании краевой задачи

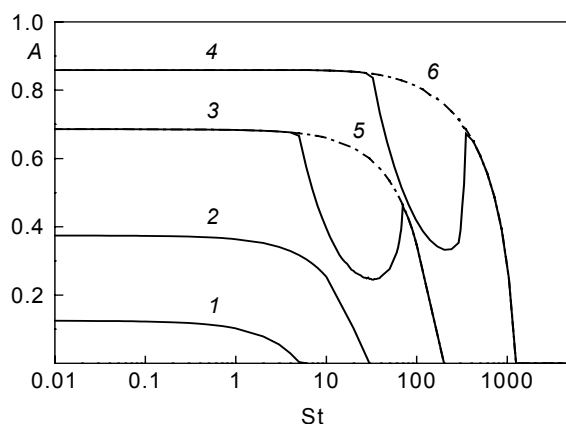


Рис. 7. Зависимость $A(St)$ в случае ориентации пробоотборника отверстием вниз при $a=0$ и различных значениях v_s (1 – 0.014; 2 – 0.01; 3, 5 – 0.005; 4, 6 – 0.002) для $h=0.016$ (1–4) и $h=0.16$ (5, 6)

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. 8).

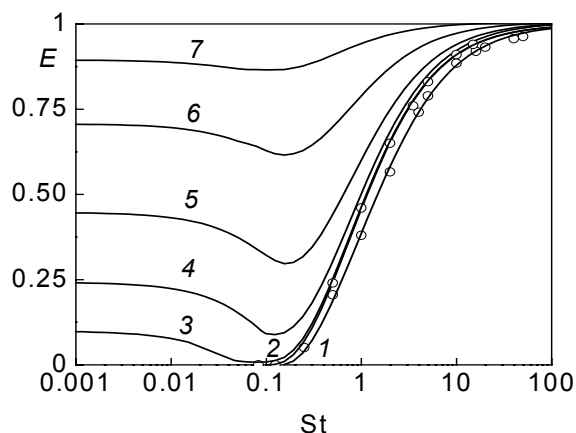


Рис. 8. Зависимость коэффициента захвата от числа Стокса для различных значений скорости стационарного оседания, 1 – цилиндр, 2–7: $v_s = 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2$

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 (рис. 9). В [16–18] предложена математическая модель аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник. Вдали от пробоотборника воздух считается неподвижным, а

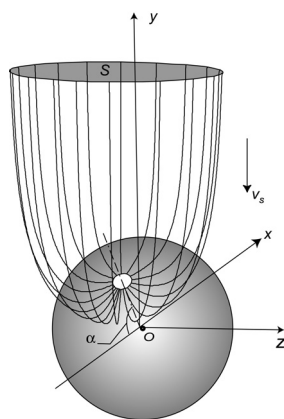


Рис. 9. Поверхность предельных траекторий и область захвата частиц S при аспирации в сферический пробоотборник из неподвижной среды

аэрозольные частицы падают под действием гравитации. Часть частиц захватывается в сферический пробоотборник диаметра D через входное отверстие диаметра d , ориентированное под разными углами относительно направления силы тяжести (обычно $H = d/D \ll 1$). 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 $A = V_s S / Q = 4V_s S / U_a p d^2$, где S – площадь поперечного сечения трубки предельных траекторий вдали от пробоотборника, $U_a = 4Q / (\pi d^2)$ – 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 N отдельными точечными стоками, равномерно распределенными по входному отверстию (конечномерный сток). Суммарное поле скоростей вычисляется как суперпозиция полей скоростей от отдельных точечных стоков. Для описания движения частиц используются безразмерные уравнения, записанные в предположении стоксового закона сопротивления и учитывающие гравитацию.

Характер траекторий частиц вокруг сферического пробоотборника определяется наличием и местоположением стационарных точек уравнений движения аэрозольных частиц. Особые точки являются точками покоя, то есть скорость и

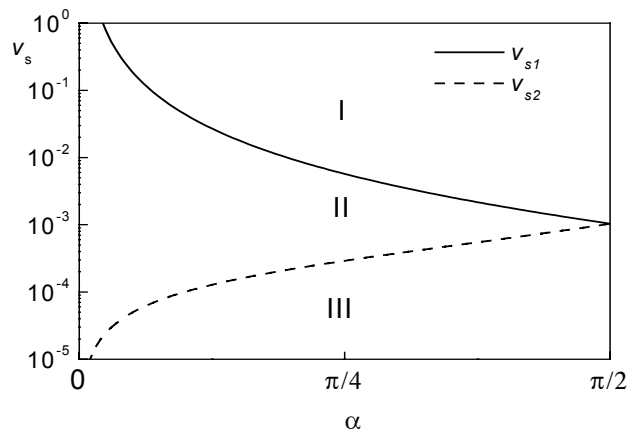


Рис. 10. Функции v_{s1} , v_{s2} и области I–III в плоскости (v_s, α)

ускорение частицы в них обращаются 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. Получены критерии существования в области решения одной и двух особых точек, связывающие значения скорости осаждения, угла ориентации и относительного диаметра входного отверстия:

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

Поведение функций (4) при $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ показано на рис. 10. В плоскости (v_s, α) можно выделить три области: I ($v_s > v_{s1}$) – особые точки вне сферы отсутствуют, II ($v_{s2} < v_s \leq v_{s1}$) – в плоскости симметрии $z=0$ существует единственная особая точка, лежащая за пределами сферы, III ($v_s \leq v_{s2}$) – в плоскости $z=0$ существуют две особые точки. К области II относится также область $\alpha \leq 0$ при любых v_s .

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 зависят 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; зона (iv), не занятая частицами (рис. 11). Предельные траектории на рис. 11 выделены жирными линиями. При параметрах v_s и α , попадающих в области II и II, аспирирующее отверстие становится сопряженным с областью без частиц, т. е. наряду с аэро-

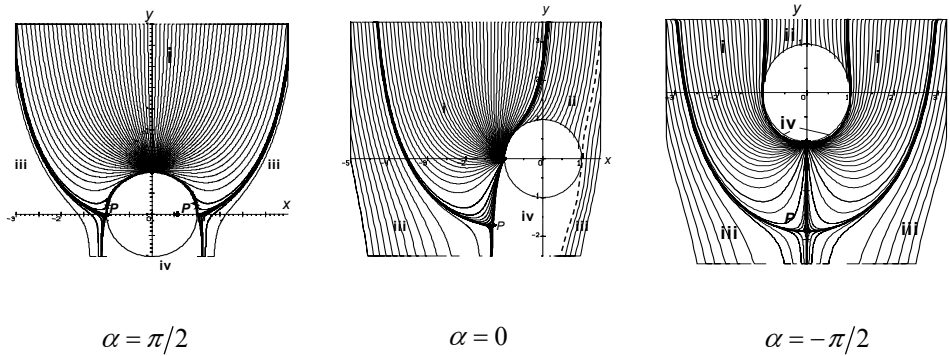


Рис. 11. Траектории в плоскости $z = 0$ (а) для $St = 1$, $v_s = 0.001$, $H = 0.1$

золе будет аспирироваться дополнительно чистый воздух и, следовательно, коэффициент аспирации окажется меньше единицы.

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. 12. Коэффициент аспирации, рассчитанный в рамках модели конечномерного стока, перестает

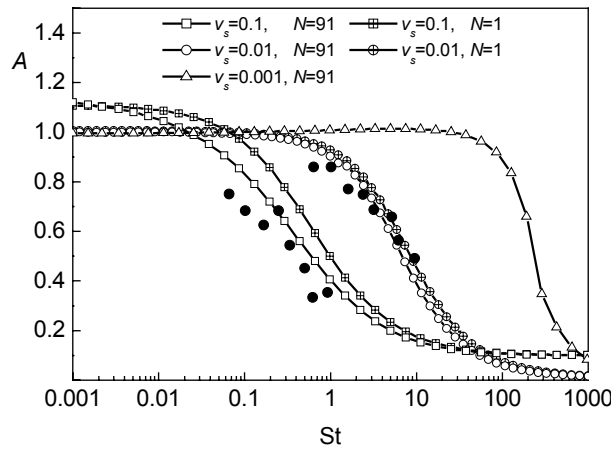


Рис. 12 Зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса при различных v_s для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вверх. Черные кружки – экспериментальные точки [19]

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 [19]. Общая закономерность в поведении коэффициента аспирации заключается в наличии участка с практи-

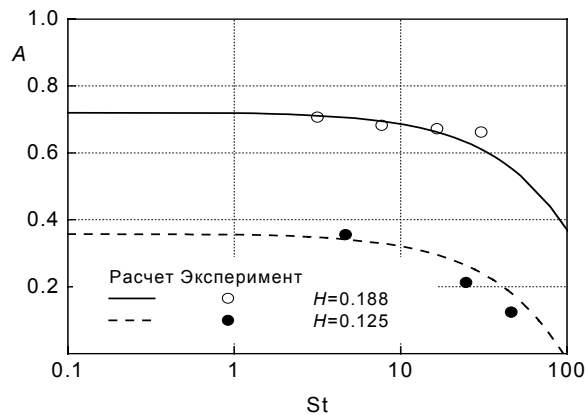


Рис. 13. Зависимость $A(St)$ для пробоотборника, ориентированного вертикально отверстием вниз ($\alpha = -\pi/2$), при $v_s = 0.01$ и двух значениях H . Кружки – экспериментальные точки [19]

чески постоянным значением A , определяемым при малых числах Стокса формулой, что соответствует безинерционному движению частиц. При этом меньшим значениям скорости седиментации соответствует большая длина такого участка. Отличие коэффициента аспирации от единицы обусловлено 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 пробоотборника больше коэффициента аспирации при его вертикальном положении 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 $A = 1 - v_s H^{-2}$. Из условия $A = 0$ следует формула $v_s = H^2$ 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. 13. Кружки соответствуют экспериментальным данным из [19]. Наблюдается удовлетворительное согласование результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (проекты №№ 99-01-00-169, 02-01-00836, 05-01-00794).

Summary

S.K. Zaripov, R.S. Galeev, E.V. Skvortsov, M.V. Vanyunina. Modern problems of aerosol sampling theory.

Review of the studies into the aerosol sampling theory is given. The aerosol sampling from moving and calm air into the slot and cylindrical samplers were studied. The sampling into thin-walled tube and tube located on the infinite cylinder were also investigated. The mathematical model of aerosol aspiration into the spherical sampler from calm air is proposed. The analysis of singular points of particle motion equations for the sphere with suction was developed. The aspiration efficiency as a function of particle size, ratio of the wind and sampling velocities, settling velocity and the angle of the sampler orientation relatively the wind velocity and gravity force directions were studied.

Литература

1. *Ramachandran G., Sreenath A., Vincent J.H.* Towards a new method for experimental determination of aerosol sampler aspiration efficiency in small wind tunnels // *J. Aerosol Sci.* – 1998. – V. 29, No 7. – P. 875–891.
2. *Vincent J.H.* Aerosol sampling: science and practice. – London: Wiley and Sons, 1989. – 416 p.
3. *Левин Л.М.* Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 268 с.
4. *Волощук В.М.* Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 208 с.
5. *Dunnnett S.J., Ingham D.B.* The Mathematics of Blunt Body Sampling. Lecture Notes in Engineering. – Berlin: Springer-Verlag, 1988.
6. *Зарипов Ш.Х., Киселев О.М.* Об аспирации аэрозоля в щель между двумя пластинами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 487–491.
7. *Ванюнина М.В., Зарипов Ш.Х., Скворцов Э.В.* Аспирация аэрозоля в щелевой пробоотборник при двух углах его ориентации // *Изв. РАН. МЖГ.* – 2002. – № 3. – С. 108–113.
8. *Зарипов Ш.Х.* Расчет траекторий аэрозольных частиц в плоскости годографа скорости // *Изв. РАН. МЖГ.* – 1994. – № 3. – С. 129–134.

9. Ванюнина М.В., Зарипов Ш.Х. Математическая модель аспирации аэрозоля с учетом испарения // Тр. Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Т. 3. Краевые задачи и их приложения. – Казань: «Унипресс», 1999. – С. 155–156.
10. Зарипов Ш.Х., Зигангареева Л.М., Киселев О.М. Аспирация аэрозоля в трубку из неподвижной среды // Изв. РАН. МЖГ. – 2000. – № 2. – С. 104–109.
11. Dunnett S.J. A mathematical study of the sampling characteristics of a thin-walled sampler in calm air // Aerosol Sci. and Technol. – 1992. – V. 17, No 2. – P. 93–104.
12. Fokin D.A., Zaripov Sh.Kh. Aerosol sampling study using ANSYS/FLOTTRAN CFD code // Proceeding of the 17-th German CADFEM meeting, Sonthofen, 6–8 Oct. 1999. – No 1.2.9.
13. Fokin D.A., Zaripov Sh.Kh. Numerical study of aerosol sampling into a tube located on infinite cylinder // Тр. межд. аэрозольная конф., посвящ. памяти проф. А.Г. Сутугина, Москва, 26–30 июня 2000 г. – С. 230–236.
14. Ванюнина М.В., Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х., Скворцов Э.В. Аспирация аэрозоля в цилиндрический пробоотборник из низкоскоростного нисходящего потока и неподвижной среды // ПМТФ. – 2005. – № 2. – С. 122–129.
15. Galeev R.S., Zaripov S.K. Deposition of aerosol particles on a sphere: the role of gravity // Aerosol Sci. and Technol. – 2003. – V. 37. – P. 325–329.
16. Galeev R.S., Zaripov S.K. Theoretical study of aerosol sampling by an idealised sampler in calm air // J. Aerosol Sci. – 2003. – V. 34, No 9. – P. 1135–1150.
17. Галеев Р.С., Зарипов Ш.Х. Аспирация аэрозоля в сферический пробоотборник в неподвижном воздухе // Тр. Матем. центра им. Н.И. Лобачевского. Материалы XVI сессии Межд. Школы по моделям механики сплошной среды, Казань, 27 июня – 3 июля 2002 г. – Казань: Изд-во Казан. матем. общ-ва, 2002. – С. 138–142.
18. Galeev R.S., Zaripov S.K. A mathematical study of aerosol sampling by a spherical sampler in calm air // J. Aerosol Science. Abstracts of the European Aerosol Conf., Madrid, Spaine. – 2003. — V. 2. – P. 1219–1220.
19. Su W.C., Vincent J.H. Experimental measurements of aspiration efficiency for idealized spherical aerosols samplers in calm air // J. Aerosol Sci. – 2003. – V. 34, No 9. – P. 1151–1165.

Поступила в редакцию
18.05.05

Зарипов Шамиль Хузеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры моделирования экологических систем Казанского государственного университета.

E-mail: Shamil.Zaripov@ksu.ru

Галеев Равиль Саидович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

E-mail: Ravil.Galeev@ksu.ru

Скворцов Эдуард Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования экологических систем Казанского государственного университета.

E-mail: Eduard.Scvortsov@ksu.ru

Ванюнина Марина Валерьевна – младший научный сотрудник НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского государственного университета.

E-mail: mvanioun@ksu.ru