

УДК 537.533

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОЛЕТА ЧАСТИЦ В УЛАВЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

В. Л. Федяев, И. В. Моренко

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук,
Казань, Россия

Проведено моделирование работы инерционных улавливающих устройств: водо- и пылеуловителей. В ряде случаев рассчитаны траектории частиц. Осуществлено сравнение расчетных значений эффективности улавливания с экспериментальными данными. На основе полученных результатов сделан анализ особенностей поведения частиц, представлены рекомендации по улучшению работы улавливающих устройств.

В химической, нефтехимической, в металлургии и других отраслях промышленности широко применяются инерционные улавливающие устройства: капле- и пылеуловители. Они устанавливаются на пути газовых потоков и увлекаемых ими капель или твердых частиц и представляют собой решетки из пластин различной конфигурации, например, в виде уголка, трапеции, дуги и т. д. [1—4]. Осаждение частиц на пластинах инерционных устройств осуществляется в основном под влиянием сил инерции [5]. Размеры улавливаемых частиц варьируются в большом диапазоне. Так, в воздушных потоках работающей градирни движутся капли величиной 10—500 мкм и частицы тумана 1—10 мкм [1, 6].

Жалюзийные пылеуловители благодаря простоте конструкции и дешевизне пользуются, как правило, для предварительной очистки газов перед циклонами. Широко применяется и мокрое пылеулавливание, которое в ряде случаев оказывается более эффективным, чем сухое [7].

При эксплуатации улавливающих устройств возникает ряд технических проблем, в частности, недостаточно высок коэффициент улавливания, создается высокое добавочное сопротивление воздушным потокам. Кроме того, при производстве каплеуловителей используется большой объем дорогостоящих материалов. В связи с этим возникла необходимость моделирования газовых потоков и расчета траекторий частиц с целью анализа работы улавливающих аппаратов, улучшения их конструкции.

При определенных допущениях можно считать, что на жидкую частицу действуют силы, подобные тем, что действуют на твердую частицу, взвешенную в потоке газа. Поэтому с точки зрения математического моделирования, процессы, происходящие в каплеуловителях, аналогичны процессам в пылеуловителях, но лишь до соприкосновения частиц со стенками.

Особенность осаждения капель состоит в том, что уловленные капли могут быть отведены в виде струек жидкости [7]. Многие авторы, изучавшие осаждение твердых частиц на стенках, считают, что частицы могут прилипнуть к стенке, а затем быть сдуты потоком. Однако это маловероятно при существующих скоростях воздушных потоков, поскольку для сдувания находящихся на стенках частиц требуются гораздо большие скорости течения, чем те, при которых движущиеся частицы могут прилипнуть к стенке [1].

Перед тем как перейти к математической формулировке, назовем основные допущения. Предположим, что потоки газа двумерны и стационарны; сжимаемость газа не учитывается, его движение ламинарно и потенциально. Твердые

частицы, капли жидкости имеют сферическую форму. Их вращение и деформации капель не учитываются. Они рассматриваются как материальные точки. Допускается также, что перед улавливающими устройствами, на определенном удалении от них, частицы располагаются равномерно.

Пусть Ω — ячейка периодичности улавливающей решетки; Ω' — часть области перед ней (рис. 1). Предварительно рассмотрим потоки газа в Ω' . Если не учитывать влияние пластин, расположенных выше $O'A'$ и ниже OA , то течение вблизи границы S_1 можно представить как суперпозицию полей при обтекании пластин OA и $O'A'$. Пользуясь методом теории функций комплексного переменного, найдем аналитические оценки скорости газа.

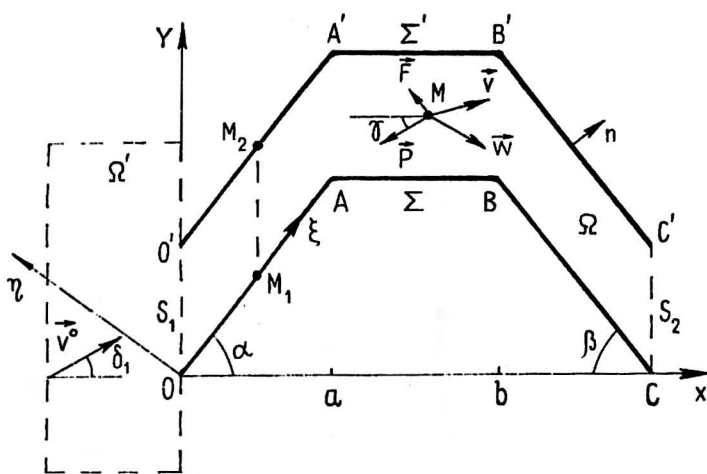


Рис. 1. Ячейка периодичности улавливающей решетки

Пусть $\zeta = \xi + i\eta$ — комплексная переменная. В соответствии с известными решениями [8], комплексно сопряженную скорость $\bar{v} = v_{\xi} - i v_{\eta}$ представим в виде $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{v}_1 + \bar{v}_2$, где

$$\begin{aligned} \bar{v}_0 &= U \exp[-i(\delta - \alpha)], \\ \bar{v}_1 &= iU \sin(\delta - \alpha) \left(1 - \sqrt{\frac{\zeta - 2a}{\zeta}} \right), \\ \bar{v}_2 &= iU \sin(\delta - \alpha) \left(1 - \sqrt{\frac{\zeta - 3a + \bar{a} - i\bar{h}}{\zeta - a + \bar{a} - i\bar{h}}} \right). \end{aligned}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

- U — скорость газа на бесконечности;
- h — расстояние между пластинами;
- $2a$ — длина пластины;
- α — угол наклона пластины;
- δ — угол набегающего потока;
- $\bar{a} = a - h \sin \alpha$, $\bar{h} = h \cos \alpha$.

Точки O, O' — особые, в них $v = \infty$. Поэтому при вычислении вектора скорости в сечении S_1 от этих точек отступаем на некоторую малую величину ϵ . Для

того чтобы обеспечить в сечении S_1 заданный расход Q на отрезке M_1M_2 , размещается n стоков соответствующей интенсивности. В результате вектор скорости в точке (ξ, η) области Ω' будет $\vec{v}^{**} = \vec{v} + \vec{v}^*$,

$$\text{где } v_{\xi}^* = -\frac{Q^*}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\xi - \xi_i^*}{(\xi - \xi_i^*)^2 + (\eta - \eta_i^*)^2};$$

v_{η}^* вычисляется аналогично;

ξ_i^*, η_i^* — координаты i -го стока.

Для описания движения жидкости в области Ω введем функцию тока ψ , связанную с проекциями скоростей равенствами [9]:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Согласно условию потенциальности потока в Ω имеем:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

На непроницаемых стенках канала нормальная скорость $v_n = 0$, поэтому положим:

$$\psi \Sigma = 0, \quad \psi \Sigma' = -Q. \quad (2)$$

На входе в сечении S_1 зададим скорость через расход:

$$\psi = -\frac{Q}{h} y. \quad (3)$$

На выходе в сечении S_2 предполагается, что вектор скорости параллелен стенкам

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = -\frac{Q \tan \beta}{h}. \quad (4)$$

Перейдем в задаче (1—4) к безразмерным величинам, введя характерные размеры: длины l , времени l^2/Q , скорости Q/l , расхода Q , силы mQ^2/l^3 , давления mQ^2/l^4 . В результате для расчета потока газа в Ω получим задачу:

$$\begin{aligned} \Omega: \quad & \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0; \\ \Sigma: \quad & \psi = 0; \\ \Sigma': \quad & \psi = -1; \\ S_1: \quad & \psi = -\frac{Y}{\chi}; \\ S_2: \quad & \frac{\partial \psi}{\partial n} = -\frac{\tan \beta}{\chi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\chi = h/l$.

Рассмотрим полет частиц. Представляя их материальными точками с массой m и скоростью ω , закон движения запишем в виде:

$$m \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} = \vec{P} + \vec{F}.$$

Здесь $\vec{r} = \vec{r}(x, y)$ — радиус-вектор центра масс;

\vec{P} — сила тяжести;

\vec{F} — сила сопротивления.

Исходя из экспериментальных данных, теоретических оценок, силу \vec{F} аппроксимируем зависимостью:

$$\vec{F} = k(\vec{v} - \vec{\omega}),$$

где $(\vec{v} - \vec{\omega})$ — относительная скорость центра масс частиц.

Согласно формуле Стокса, $k = 6\pi\mu a$ (μ — динамический коэффициент вязкости газа, a — радиус частицы).

Отметим, что с достаточной степенью точности формула Стокса применима для всех случаев, встречающихся в промышленной практике [7].

Учитывая допущение о равномерном распределении частиц перед решеткой, положим, что в начальный момент времени частицы размещаются вдоль границы области Ω' , за исключением S_1 , на некотором расстоянии друг от друга. При этом они обладают скоростью $\vec{\omega}^0$, определяемой из уравнения равновесия:

$$\vec{P} + \vec{F} = 0.$$

После ряда преобразований, перехода к безразмерным величинам, получим задачу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 X}{\partial T^2} + K \frac{\partial X}{\partial T} &= KV_x - G \cos \gamma; \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + K \frac{\partial Y}{\partial T} &= KV_y - G \sin \gamma; \\ T_0 = 0: \quad X_0 &= X^0, \quad Y_0 = Y^0; \\ W_x^0 &= -\frac{G}{K} \cos \gamma - V^0 \cos \delta_0; \\ W_y^0 &= -\frac{G}{K} \sin \gamma - V^0 \sin \delta_0. \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь X, Y — координаты частицы;

T — время;

V_x, V_y — компоненты вектора скорости газа;

γ — направление силы тяжести;

W_x^0, W_y^0, V^0 — компоненты вектора скорости частицы и модуль вектора скорости газа в начальный момент времени;

δ_0 — угол набегающего потока,

$$K = \frac{k l^2}{Q m}, \quad G = \frac{g l^3}{Q^2} \text{ — коэффициенты.}$$

Прежде чем приступить к численным экспериментам, на основе представленных таким образом задач, желательно убедиться в адекватности данных математических моделей исследуемым явлениям. Для этого необходимо провести сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Анализ литературных данных показывает, что получить истинные показатели улавливания сложно. При лабораторных испытаниях они оказываются более высокими, чем на производстве. Это объясняется наличием щелей между блоками, изменением в процессе эксплуатации скоростного напора газа, которое влечет за собой вторичный унос частиц, рядом других факторов. Следовательно, при сравнении результатов обстоятельства надо иметь в виду.

Обратимся непосредственно к экспериментам. Согласно [7], эффективность работы механического сепаратора зависит от скорости газового потока и размеров капель. Показатель улавливания возрастает по мере уменьшения расстояния между пластинами и увеличения скорости газа [10] до предела, за которым происходит захлебывание каплеуловителя и начинается вторичный унос. К сожалению, при сокращении расстояния между пластинами возрастает аэродинамическое сопротивление, и в итоге падает охлаждающий эффект градирни.

Представляются интересными исследования J. Smith и M. Goglia [11] механизмов работы жалюзийных пылеотделителей в средах с твердой алуидовой пылью. Пропуская через пылеотделитель очень тонкую фракцию пыли и наблюдая ее при боковом освещении, авторы определили поле течения. Затем перешли к крупным частицам и проследили их траектории. Наблюдается весьма низкая эффективность пылеотделителя при радиусе $a = 10$ мкм; с увеличением a она быстро растет и достигает 95—97 % при $a = 20$ мкм.

Работу уголкового пылеуловителя рассматривали Г. М. Гордон и И. А. Пейсахов [12]. Поскольку результаты экспериментов показаны ими наиболее полно, они взяты для сравнения. Расчетная область приведена на рис. 2, а. Пластины выполнены в виде уголка со сторонами 0,04 м. Скорость воздуха на бесконечности равна 10 м/с, угол набегающего потока составляет 105° с положительной полуосью OX . Согласно расчетам, с увеличением размеров частиц КПД улавливания быстро растет (см. рис. 2, б, кривая 1), в экспериментах же рост КПД медленнее (см. рис. 2, б, кривая 2). Возможно, это объясняется вторичным уносом.

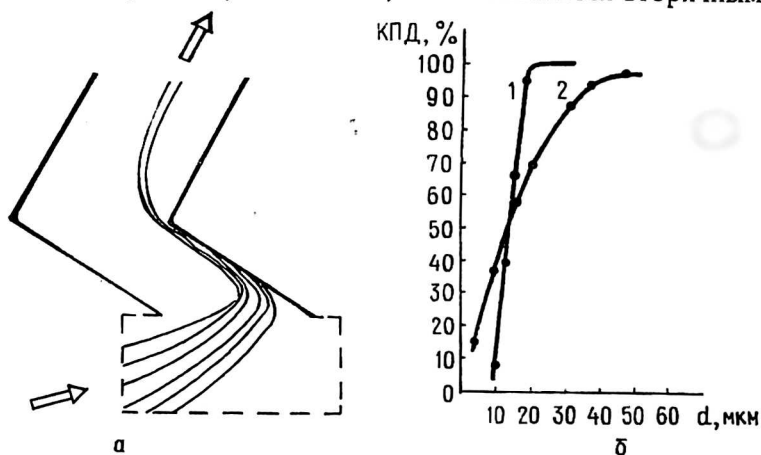


Рис. 2. КПД уголкового пылеуловителя:
а — расчетные данные;
б — экспериментальные данные

Подобные результаты приведены и в работе [1], где анализируется работа сепараторов ударного действия. Отмечается, что большие частицы, которые легче всего отделить, перемещаются с меньшей скоростью. Скорость мелких частиц приближается к скорости газа. Этим можно объяснить, почему расчетное влияние размеров частиц на эффективность улавливания выражено всегда более резко по сравнению с экспериментально определенным. Экспериментальные кривые часто пересекают расчетные при эффективности порядка 50 %, указывая на то, что отличие расчетной эффективности объясняется не несовершенством теории, а, скорее, недостаточностью наших знаний о скоростном спектре частиц различных размеров, взвешенных в движущемся потоке газа. То же самое наблюдается и при анализе данных по центробежной сепарации.

Далее исследована работа каплеуловителя, выпускаемого ТОО Полимерхолдтехника (г. Нижнекамск) (рис. 3). Его характерные размеры: ширина 0,04 м;

длина 0,14 м; $\gamma = 30^\circ$ — угол направления силы тяжести; $Q = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ — расход.

Проведены численные эксперименты, в которых менялись угол и расход набегающего потока газа. Если поток на выходе направлен вдоль стенок, то, поскольку ширина второй подобласти больше, чем в первой и третьей, скорость воздуха несколько падает и часть капель оседает именно здесь, двигаясь под влиянием сил инерции. Траектории капель радиуса $a = 5 \cdot 10^{-5}$ м показаны на рис. 3. На третьем участке заметно влияние тянущей аэродинамической силы. Чтобы убедиться в правильности решений, полученных численными методами, сравним их с аналитическими оценками.

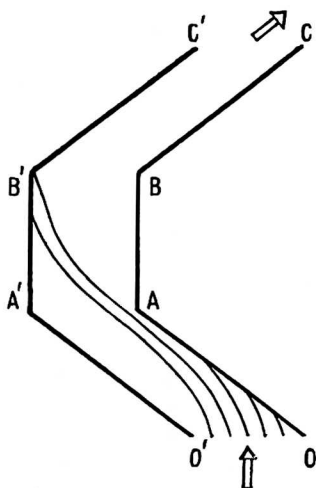


Рис. 3. Траектории капель

Для получения инженерных оценок предположим, что скорость потока постоянна по сечению, параллельна стенкам на каждом из трех выделенных участков и будет:

$$\begin{aligned} v_y &= \tan \alpha / \chi, & 0 \leq x < a; \\ v_y &= 0, & a \leq x \leq b; \\ v_y &= -\text{tg } \beta / \chi, & b < x \leq 1; \\ v_x &= 1/\chi, & 0 \leq x \leq 1. \end{aligned}$$

В результате получим аналитическое решение задачи (6):

$$\begin{aligned} X &= K_x T + X_0; \\ Y &= K_y T - G_y (1 - \exp(-KT)) + Y_0; \\ K_x &= V_x - \frac{G}{K} \cos \gamma; \\ K_y &= V_y - \frac{G}{K} \sin \gamma; \\ G_y &= (K_y - W_y^0) / K. \end{aligned}$$

Отметим, что данные аналитические решения хорошо согласуются с численными.

В ходе численных экспериментов было показано также, что в случае, когда направление набегающего потока отличается от направления стенок OA , $O'A'$; эффективность улавливания возрастает. Она растет при увеличении расхода воздуха и, соответственно, падает, если увеличивается зазор между пластинами.

Рассмотрим каплеуловитель, показанный на рис. 4. В этом случае ширина канала на входе и выходе по 0,13 м, длина стенок на первом участке 0,06 м, на втором — 0,08 м. Расход воздуха подбирается из условия, что средняя скорость остается такой же, что и в предыдущей задаче.

Расчеты показали, что в целом эффективность улавливания капель данной системой мала. Это объясняется отчасти тем, что на втором участке поток ускоряется, капли выдуваются. При уменьшении щели с 0,13 до 0,1 м эффективность улавливания возрастает, однако увеличивается аэродинамическое сопротивление. Кроме того, остается опасность выноса на втором участке, в том числе и крупных капель ($a = 90$ мкм). Их траектории показаны на рис. 4. Отсюда следует, что для обеспечения высокой эффективности улавливающих устройств необходимо, чтобы число стенок каплеуловителя, поворотов потока воздуха было бы минимальным, а интенсивность движения воздуха в канале менялась бы, по возможности, максимально. В результате предлагается конфигурация, представленная на рис. 5. Из расчетов видно, что при ширине канала 0,1 м, длине стенок 0,06 м улавливание капель вполне удовлетворительное. Оседание капель происходит в основном на стенке CB ; на BA вода собирается и стекает беспрепятственно вниз. Показаны траектории капель радиуса $a = 90$ мкм.

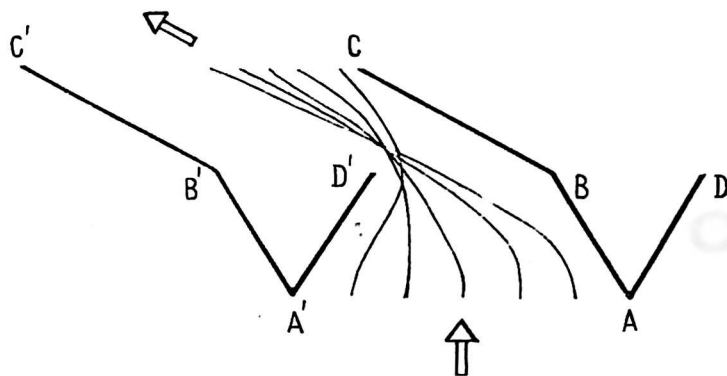


Рис. 4. Схема каплеуловителя: ширина канала на входе и выходе по 0,13 м, длина стенок на первом участке 0,06 м, на втором — 0,08 м

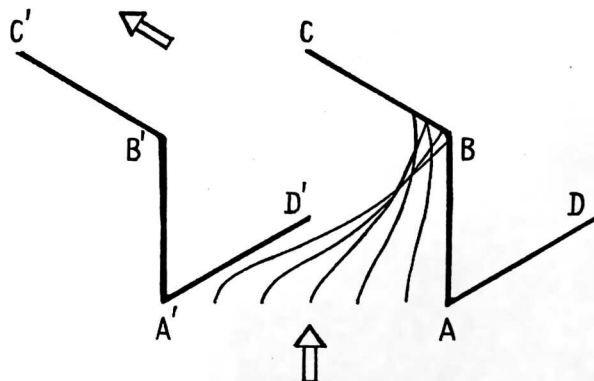


Рис. 5. Схема каплеуловителя: ширина канала 0,1 м, длина стенок по 0,06 м

В заключение отметим, что последнюю конфигурацию можно взять за основу при разработке новых систем улавливания как капель воды, так и твердых частиц.

Л и т е р а т у р а

1. Перри, Джон Г.: Справочник инженера-химика. Т. 2. — М.: Химия, Ленингр. отд., 1969. — 504 с.
2. Вальдберг А. Ю., Исянов Л. М., Тарат Э. Я. Технология пылеулавливания. — Л.: Машиностроение, 1985. — 192 с.
3. Берман Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. — М.: Госэнергоиздат, 1957. — 320 с.
4. Рысин С. А. Пылеуловители и фильтры. — М. — Л.: Госстройиздат, 1941. — 80 с.
5. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений. — М.: Химия, 1987. — 208 с.
6. Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С. // ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника *Haustech*, 1994. № 10. С. 8—11.
7. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. — М.: Химия, 1972. — 247 с.
8. Федяевский К. К., Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И. Гидромеханика. — Л.: Судостроение, 1968. — 568 с.
9. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. — Л.: Машиностроение, 1976. — 502 с.
10. Савина А. А. Пылеуловитель ударно-смывного действия УСД-ЛИОТ. — Л., 1957. — 27 с.
11. Smith J., Goglia M. *Trans ASME*, 1956. — 389 с.
12. Гордон Г. М., Пейсахов И. Л. Пылеулавливание и очистка газов. — М.: Metallurgizdat, 1958. — 500 с.

**MODELLING AND CALCULATING
OF PARTICLE FLYING IN TRAPPING DEVICES**

V. L. Fedyajev, I. V. Morenko

Institute of Mechanics and Machinery Kazan Scientific Center the Russian Academy of Sciences,
Kazan, Russia

The work modelling was carried on the inertia trapping devices: water-traps and dust-traps, particle trajectories being calculated in some cases. Trapping efficiency design dimensions, were compared with its experimental data. On the basis of the obtained results the peculiarities of particle behaviour were analysed and some recommendations on their work improving were suggested.