

Р. Р. Усманова, В. С. Жернаков

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СЕПАРАЦИЮ ЧАСТИЦ ЗАДАННОГО ДИАМЕТРА

Приведен расчет траекторий движения частиц, который позволит найти условия их улавливания и количественно определить влияние существенных факторов на процесс газоочистки. Выявлены расчетные комплексы, один из которых характеризует геометрию газопромывателя, а другой – его режимные параметры. Даны рекомендации по выбору средней осевой скорости в аппарате с учетом дисперсного состава пыли. *Траектория частиц; уравнение движения частицы; осевая скорость; эффективный диаметр частиц; дисперсный состав*

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее распространенных устройств пылеочистой техники считаются аппараты центробежного типа. Их широкое распространение обусловлено простотой устройства и надежностью в эксплуатации при небольших капитальных и эксплуатационных затратах.

К перспективным методам повышения эффективности пылеулавливания мелкодисперсных частиц можно отнести мокрую очистку газа. Для этого метода характерны сложные массообменные процессы в ходе взаимодействия газодисперсного потока с каплями орошающей жидкости, в результате чего изменяются скорость и концентрация фаз, определяющие газоочистку.

Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной гидродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Вопросам изучения вихревых центробежных аппаратов посвящено много работ, накоплен обширный экспериментальный материал. Тем не менее многие важные вопросы расчета и конструирования вихревых аппаратов не нашли пока систематизированного рассмотрения.

Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной гидродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров.

Ценность многих существующих экспериментальных и теоретических исследований снижается вследствие отсутствия единой методики определения важнейших параметров.

Таким образом, систематизированное рассмотрение гидродинамики и эффективности работы вихревых аппаратов, получение и обобщение зависимостей между режимно-конструктивными параметрами аппарата является актуальной задачей.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ДОПУЩЕНИЯ

Для постановки задачи моделирования и последующего исследования процессов, протекающих в вихревых центробежных аппаратах, необходимо определить связь между параметрами закручивающего устройства и формируемого им течения. Поскольку численное моделирование трехмерных течений на сегодняшний день является проблематичным, данная задача сливается с известной проблемой характеристик закрученных течений и закручивающих устройств.

Рассмотрим механизм пыле-газоочистки на примере динамического газопромывателя [1].

Улавливание пыли в газопромывателе основано на использовании центробежных сил. Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса и совершает движение по нисходящей спирали. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, пылевидные частицы перемещаются к стенкам аппарата (рис.1).

При движении во вращающемся криволинейном потоке газа частицы пыли находятся под действием центробежной силы и силы сопротивления.

Анализ закрученного газопылевого течения в газопромывателе будем проводить при следующих допущениях:

- газ считается идеальной и несжимаемой жидкостью, следовательно, его движение потенциально;
- газовый поток осесимметричен и стационарен;
- окружная проекция скорости газа изменяется по закону

$$w_{\phi} = \text{const} \cdot \sqrt{r};$$

- этот закон, наблюдаемый в экспериментах [2, 3], позволит получить простое решение, удобное для количественного анализа движения частиц;

- частица не меняет во времени свою форму и диаметр, не происходит ни ее дробления, ни коагуляции. Отклонение формы частицы от сферы учитывается коэффициентом K ;

- обтекание частицы потоком газа носит вязкий характер. Турбулентные пульсации газа не учитываются, что согласуется с выводом работы [4]: турбулентная диффузия частиц не оказывает заметного влияния на процесс пылеулавливания;

- не учитываются силы Жуковского, Архимеда, тяжести, поскольку указанные силы на несколько порядков меньше по сравнению с силами аэродинамического сопротивления и центробежной [5, 6];

- концентрация пыли мала, следовательно, можно не учитывать взаимодействие частиц;

- пренебрегаем неравномерным распределением осевой проекции скорости газа по радиусу, что находится в соответствии с данными работы [7], согласно которой осевая проекция скорости частиц слабо изменяется по радиусу трубы.

Из-за вращения очищаемого потока в газопромывателе создается поле инерционных сил, которое и приводит к разделению смеси газов и частиц. Поэтому для расчета траекторий движения частиц необходимо знать их уравнения движения и аэромеханику газового потока. В соответствии с предположением о малой концентрации пыли, влиянием частиц на газовый поток можно пренебречь. Следовательно, можно рассматривать движение отдельной частицы в поле скоростей газового потока. Поэтому задача определения траекторий частиц в газопромывателе разлагается на две:

- определение поля скоростей газового потока,
- интегрирование уравнений движения частицы с учетом расчетного поля скоростей газа.

Допущение об осевой симметрии рассматриваемой задачи (за исключением входного отверстия) позволяет при рассмотрении движения частиц пользоваться цилиндрической системой координат.

Наибольшую трудность представляет улавливание мелкодисперсной пыли, для которой сила сопротивления с достаточной точностью вычисляется по формуле Стокса, этими соображениями обусловлено третье допущение. При увеличении запыленности коэффициент очистки аппарата растет [8], поэтому расчет параметров газопромывателя при малой запыленности (согласно допущению б) гарантирует его минимальную эффективность.

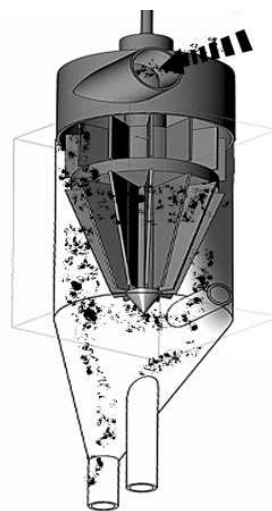


Рис. 1. Траектории движения частиц в динамическом газопромывателе

3. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

Для расчета траекторий частиц необходимо знать их уравнения движения. Такая задача для некоторого частного случая решается автором [9].

Введем систему координат $OXYZ$. Ее ось OZ направим вдоль оси симметрии газопромывателя (см. рис. 2). Закон движения пылинки в неподвижной системе координат $OXYZ$ можно записать в следующем виде:

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm}, \quad (1)$$

где m – масса частицы; $d\vec{v}_q$ – скорость частицы; \vec{F}_{Cm} – аэродинамическая сила (вычисляется по формуле Стокса).

Для расчетов необходимо представить векторное уравнение (1) движения частицы в скалярной форме.

Положение частицы будем задавать ее цилиндрическими координатами (r ; φ ; z). Скорость частицы определим тремя составляющими: U_q – тангенциальная, V_q – радиальная и W_q – аксиальная скорости.

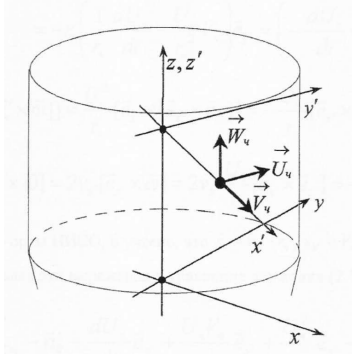


Рис. 2. Вектор скорости движения частицы

Примем систему координат $O'X'Y'Z'$, пусть ось $O'X'$ проходит через саму частицу, а ось $O'Z'$ лежит на оси OZ . Принятая система отсчета движется поступательно по оси OZ со скоростью W_q и вращается вокруг нее с угловой скоростью

$$\omega(t) = \frac{U_q}{r_q} \quad (2)$$

Уравнение движения частицы массой $m = \frac{1}{6} \pi r_q^3 d_q^3$ в системе координат $O'X'Y'Z'$ примет вид:

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + m \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + m \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right] + 2m \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right]$$

или

$$\frac{d\vec{v}_q}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}_{Cm} - \vec{a}_0 + \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right] + 2 \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right], \quad (3)$$

где \vec{a}_0 – вектор поступательного ускорения системы отсчета; $d\vec{v}_q$ – скорость частицы; r_q – радиус-вектор частицы; $\left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right]$ – ускорение, обусловленное неравномерностью вращения;

$\left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right]$ – центробежное ускорение; $2 \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right]$ – ускорение Кориолиса.

Первое слагаемое правой части уравнения (3) представляет собой силу, действующую с потоком газа на частицу, и определяется по формуле Стокса:

$$F_{cm} = 3\pi \mu_z d_q \left[\vec{v}_z - \vec{v}_q \right] \quad (4)$$

где μ_z – динамическая вязкость газа.

Второе слагаемое (3) определяется как

$$\frac{dW_q}{dt} e_z = \frac{dW_q}{dt} e_z.$$

Преобразуем оставшиеся слагаемые:

$$\begin{aligned} \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] &= \left[\vec{r}_q \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} \right] = \left[\vec{r}_q \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{U_q}{r_q} e_z \right) \right] = \\ &= -r_q \left(\frac{1}{r_q} \frac{dU_q}{dt} - \frac{U_q}{r_q^2} V_x \right) e_y = \left(-\frac{dU_q}{dt} + \frac{U_q V_x}{r_q} \right) e_y; \\ \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right] &= \frac{U_q^2}{r_x} \left[e_z \cdot \left[e_x \cdot e_z \right] \right] = \\ &= -\frac{U_q^2}{r_q} \left[e_z \cdot e_y \right] = \frac{U_q^2}{r_q} e_x; \\ 2 \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right] &= 2v_{x'} \left[e_{x'} \cdot e_z \right] = \\ &= 2v_{x'} \frac{U_x}{r_q} \left[e_{x'} \cdot e_z \right] = \left(-2 \frac{U_x V_q}{r_q} \right) e_y, \end{aligned}$$

где $-e_x, e_y, e_z$ орты системы отсчета и учтено, что $\vec{r}_q = e_x \cdot r_q \cdot v_x = V_q$

Подставляя эти выражения в уравнение движения (3), получаем

$$m \frac{d\vec{v}_q}{dt} = \vec{F}_{Cm} - m\vec{a}_0 + m \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + m \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + m \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right] + 2m \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right]$$

или

$$\frac{d\vec{v}_q}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}_{Cm} - \vec{a}_0 + \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] + \left[\vec{\omega} \cdot \left[\vec{r}_q \cdot \vec{\omega} \right] \right] + 2 \left[\vec{v}_q \cdot \vec{\omega} \right]$$

Запишем это уравнение в проекциях на оси системы координат $O'X'Y'Z'$

$$\begin{cases} \frac{dV_{x'}}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmx'} + \frac{U_q^2}{r_q} \\ 0 = \frac{1}{m} F_{Cmy} - \frac{dU_q}{dt} - \frac{U_q V_x}{r_q} \\ 0 = \frac{1}{m} F_{Cmz} - \frac{dW_q}{dt} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \frac{dV_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmx} + \frac{U_q^2}{r_q} \\ \frac{dU_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmy} - \frac{U_q V_q}{r_q} \\ \frac{dW_q}{dt} = \frac{1}{m} F_{Cmz} \end{cases} \quad (5)$$

Мы получили уравнение движения частицы во вращающемся газовом потоке в проекциях на оси цилиндрической системы координат.

Подставляя (2) и (4) в формулу (5), получим систему уравнений движения частицы:

$$\begin{cases} \frac{dV_q}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_q d_q^2} (V_z - V_q) + \frac{U_q^2}{r_q} \\ \frac{dU_q}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_q d_q^2} (U_z - U_q) \frac{U_q V_q}{r_q} \\ \frac{dW_q}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_q d_q^2} (W_z - W_q) \end{cases} \quad (6)$$

5. ВЫВОД ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И РЕЖИМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Формальный анализ зависимостей, определяющих движение газа и твердой фазы в газопромывателе, показывает, что строгое соблюдение подобия движений в аппаратах различных размеров (но геометрически подобных) требует сохранения четырех безразмерных комплексов, например

$$\text{Re}_d = \frac{wD}{\nu}; F_r = \frac{w^2}{Dg}; A_r = \frac{\delta\rho_2}{D\rho_1}; \text{Re}_\delta = \frac{\nu\delta}{\nu}$$

Не все из этих комплексов одинаково влияют на характер движения пыли. Экспериментально установлено, что влияние числа Фруда F_r незначительно [10] и им можно пренебречь. Очевидно также, что влияние числа Рейнольдса при больших его значениях, также незначительно. Однако сохранение неизменными двух оставшихся комплексов все еще вносит значительные затруднения при моделировании аппаратов.

С другой стороны, нет необходимости в строгом соблюдении подобия в траектории движения частиц в аппаратах. Важен конечный результат – обеспечение необходимой эффективности аппарата. Для оценки параметров, характеризующих удаление частиц данного диаметра, рассмотрим приближенное решение за-

дачи о движении твердой частицы в газопромывателе. Полное решение для некоторого частного случая рассмотрены в литературе [11], это решение может быть использовано для получения зависимости в упрощенной модели течения.

Для трех координат – радиальной, тангенциальной и вертикальной – уравнения движения частицы при постоянном коэффициенте сопротивления можно записать в следующей форме:

$$\frac{dw}{dt} - \frac{d^2}{r} = -\alpha(w_r - v_r),$$

$$\frac{dw_z}{dt} = -\alpha(w_z - v_z),$$

$$\frac{dw_\phi}{dt} + 2w_r \frac{w_\phi}{r} - \alpha(w_\phi - v_\phi),$$

где α – коэффициент сопротивления движению частицы, отнесенный к ее массе.

$$\alpha = \frac{\mu}{K\rho\delta^2},$$

K – коэффициент, учитывающий влияние формы частицы (принимается $K = 2$).

Осевая проекция скорости газа и частицы совпадают, что следует из уравнения движения при пренебрежении силами тяжести. Действительно, если $\frac{dw_z}{dt} = \alpha(w_z - v_z)$, то, приняв $w_z -$

$$- v_z = \Delta w_z, \text{ получаем } \frac{d\Delta w_z}{dt} = -\alpha\Delta w_z$$

$$\Delta W_z = \Delta w_{z0} e^{-\alpha t}.$$

Если в начальный момент $w_z = v_z$ ($\Delta W_z = 0$); $\Delta W_r = 0$ и $W_r = \text{const}$, проекции скорости:

$$w_\phi = \text{const} \cdot \sqrt{r}.$$

Действительный закон $w_\phi(r)$ может заметно отличаться от принятого, но это не играет существенной роли. В рассматриваемом случае это вынуждает нас лишь вводить в расчет среднюю величину

$$\left(\frac{w_\phi^2}{r} \right)_{cp}.$$

При таких упрощениях первое из уравнений движения решается в квадратурах. Действительно, поскольку теперь

$$\frac{dw_r}{dt} + aw_r = \frac{w_\phi^2}{r},$$

то, при очевидном граничном условии $t = 0, v_r = 0$, получаем:

$$w_r \cong \frac{1}{\alpha} \left(\frac{w_\phi^2}{r} \right)_{cp} (1 - e^{-dt}).$$

Время, в течение которого поток проходит от лопастного завихрителя до выхода из аппарата, равно

$$t_1 = \frac{l}{w_{zcp}}.$$

С другой стороны, зная закон изменения радиальной скорости, можно найти время, в течение которого частица проходит расстояние от r_1 (максимальное удаление от стенки) до стенки аппарата (r_2).

$$r_2 - r_1 = \int_0^{t_1} w_r dt = \frac{w_\phi}{d_r} \int_0^{t_1} (1 - e^{-dt}) dt,$$

$$r_2 - r_1 = \frac{v_\phi}{\alpha r_{cp}} \left[t_1 + \frac{1}{\alpha} (e^{-dt} - 1) \right].$$

Подставляя в это уравнение предельное значение, равное $t_1 = t_T$, получаем:

$$\frac{\alpha r_{cp} (r_2 - r_1)}{v_\phi^2 cp} \geq \frac{l}{w_z} + \frac{1}{\alpha} \left(e^{\frac{\mu}{\rho \delta^2 K} \frac{l}{w_z}} - 1 \right)$$

или

$$\frac{\mu}{K \rho \delta^2} \cdot \frac{r_1^2 - r_2^2}{2V_\phi^2 cp} \cdot \frac{w_z}{l} \geq 1 + \frac{K \rho \delta^2}{\mu} \cdot \frac{w_z}{l} \left(e^{\frac{\mu}{\rho \delta^2 K} \frac{l}{w_z}} - 1 \right). \quad (7)$$

Изложенный подход опирается на известные зависимости и модель течения; он отличается от приведенного в ряде работ подхода только в деталях. Однако далее удалось выделить два комплекса, один из которых характеризует геометрию аппарата, а другой – режимные параметры. Использование этих комплексов упрощает расчет и, главное, позволяет учитывать влияние ряда основных факторов на требуемую скорость газа W_{zcp} и высоту аппарата l .

Структура зависимости (7) показывает целесообразность введения двух комплексов, один из которых

$$A = \frac{\mu l}{2\rho \delta^2 W_l K}$$

характеризует влияние режима течения и диаметра частиц, а другой

$$A_r = \frac{r_2}{l} \sqrt{(1 - r_1^{-2})} \operatorname{ctg} \beta \quad (8)$$

является геометрической характеристикой аппарата. В формуле (8) через r_1 обозначен относительный внутренний радиус аппарата:

$$r_1 = r_1 / r_2,$$

а β_1 – средний угол потока на выходе из направляющего аппарата

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{V_\phi}{V_z}.$$

Тогда (7) принимает простой вид $Ar \geq f(k)$, где

$$f(A) = \sqrt{\frac{1}{A} + \frac{1}{2A^2} (l^{-2A} - 1)}. \quad (9)$$

Выраженная графически на рис. 3 эта зависимость позволяет определять минимальное значение режимного параметра A_{min} для газопромывателя с заданными геометрическими параметрами A_r . При этом необходимо принимать $A > A_{min}$.

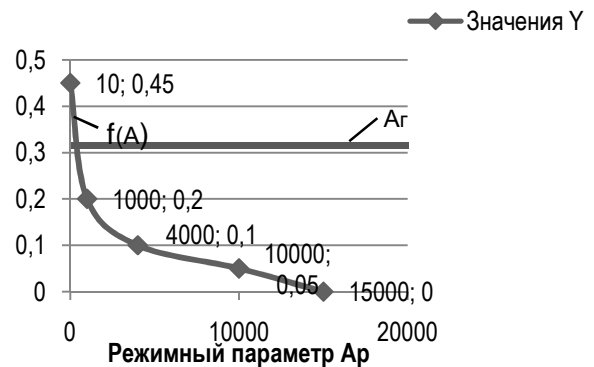


Рис. 3. Зависимость между геометрическими и режимными комплексами

Одним из важных следствий полученной зависимости является связь между диаметром частиц пыли и осевой скоростью газа. Для данного аппарата, с данными A_r , $A_{min} = \text{const}$ и, следовательно,

$$w_z \delta^2 = \text{const}.$$

Это означает, что при уменьшении размеров частиц осевая (расходная) скорость должна увеличиваться согласно зависимости

$$\frac{w_z}{w_{z0}} = \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right)^2.$$

К сожалению, значительное увеличение W_z недопустимо, так как это может привести к захвату пыли со стенок и их уносу. Можно менять также угол закручивания потока β и высоту аппарата l , не изменяя осевую скорость.

Если при уменьшении диаметра частиц δ или увеличении размеров аппарата величина A выросла, то необходимо изменить соот-

ветствующим образом A_r (с помощью графика рис. 3), и по новому значению A_r найти угол β :

$$\frac{\operatorname{ctg} \beta}{\operatorname{ctg} \beta_0} = \left(\frac{A}{A_{g0}} \right)$$

Полученную зависимость можно рассматривать как сугубо приближенную, хотя она и подтверждается некоторыми данными, в том числе и данными авторов. Важно то, что установлена связь геометрических и аэродинамических характеристик аппарата. Для другого аппарата с другим соотношением размеров и эта зависимость может быть несколько иной, хотя и не сильно отличающейся от найденной теоретически. Другими словами, для другого аппарата надо экспериментально найти эту зависимость и положить в основу расчета таких аппаратов.

6. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОЙ ОСЕВОЙ СКОРОСТИ В СЕЧЕНИИ ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯ

Известные рекомендации по выбору средней (условной) осевой скорости в вихревом аппарате не связаны непосредственно с условиями работы аппарата, параметрами частиц и т. д. Обычно рекомендуют принимать [2, 3, 6]

$$w_{\text{усл}} = 4 \cdot \frac{Q_1 + Q_2}{\pi D^2} \cong 5 - 10 \text{ м/с.}$$

Однако нет уверенности, что такая рекомендация универсальна, так как она не учитывает влияние таких важных характеристик, как вязкость газа и, главное, диаметр частиц. Поэтому большой практический интерес представляет расчетная оценка величины необходимой осевой скорости на выходе из лопастного завихрителя. Такая оценка может быть произведена в предположении, что за завихрителем окружная проекция скорости остается неизменной, а средняя осевая проекция скорости $W_{z\text{ср}}$ меньше скорости на выходе из лопастного завихрителя w_{z2} . По оценке

$$w_{z\text{ср}} = \frac{1}{2} w_{z2}$$

параметр A_r равен

$$A_r = \frac{r_2}{l} \cdot \sqrt{1 - r_1^2} \cdot \frac{w_{z\text{ср}}}{w_{\phi}} \cong 0,32.$$

По графику рис. 3 ему соответствует $A = 8,50$. Чтобы по A найти величину необходимой средней скорости $w_{z\text{ср}}$, или, иначе говоря, скорости за лопастным завихрителем w_{z2} , необ-

ходимо определить эффективный диаметр частиц δ_3 , что может быть сделано на основе рассмотренного выше приближенного решения с учетом дисперсного состава пыли.

Эффективным назовем диаметр частиц, соответствующих следующему условию. Если бы все частицы были одного диаметра δ_3 , то КПД газопромывателя совпал бы с КПД того же аппарата при работе на пыли с заданным дисперсным составом.

Характеристики дисперсного состава пыли, показаны на рис. 4.

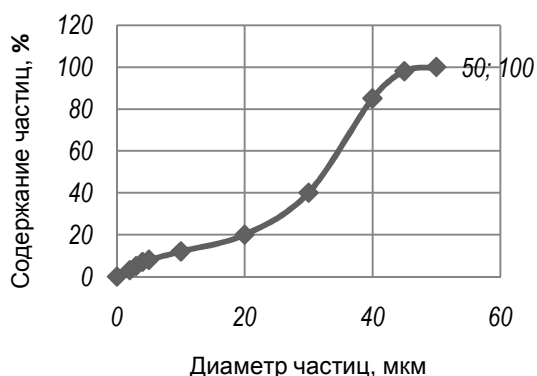


Рис. 4. Дисперсный состав пыли

По оси абсцисс отложены значения диаметра частиц δ_3 , а по оси ординат — процентное содержание всех частиц (диаметр которых меньше δ). Эти характеристики позволяют определить эффективный диаметр δ_3 по известному из опытов (или принятому) значению КПД газопромывателя. Действительно, КПД аппарата при постоянной вдоль радиуса осевой скорости W_z равен:

$$\eta = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \cdot \int 2\pi r \frac{100 - P}{100} \cdot d \cdot r.$$

С другой стороны, если бы диаметр всех частиц был одинаков (и равен δ_3), то величина P также были бы постоянной. Другими словами, в этом случае

$$\eta = \frac{100 - P_3}{100}$$

или

$$P_3 = 100 \cdot (1 - \eta).$$

По P_3 и характеристикам дисперсного состава можно найти δ_3 , а по формуле (9) подсчитать $W_{z\text{ср}}$ и W_{z2}

$$w_{z\text{ср}} = \frac{\mu l}{2K\rho\delta_3^2 A}; \quad 2 \cdot w_{z\text{ср}} = w_{z2} \quad (10)$$

По характеристике дисперсного состава, представленного на рис. 4 для $P_3 = 100(1 - \eta) = 100(1 - 0,98) = 1,3$, находим $\delta_3 = 7$ мкм. Найденному значению δ_3 соответствует

$$w_{\text{ср}} = \frac{\mu l}{2K\rho\delta_3^2 A} = 5,8 \text{ м/с}$$

(принято $k = 2$) в соответствии с этим средняя осевая скорость на выходе из лопастного завихрителя равна 11,6 м/с.

Эксперименты дают близкие значения, при режиме, начиная с которого, начинается снижение КПД $W_{\text{ср}} = 15,24$ м/с.

Разумеется, приведенный расчет носит ориентировочный характер, так как действительная картина течения в динамическом газопромывателе значительно сложнее принятой упрощенной. Однако впредь для получения более точных зависимостей можно рекомендовать формулу (7) для расчета аппаратов.

Важно отметить, что эффективный диаметр значительно (в несколько раз) меньше медианного диаметра, который обычно вводится в расчет. Именно это обстоятельство определяет неточность предложенных ранее зависимостей. Введение эффективного диаметра частиц позволило существенно сблизить расчетные и опытные данные.

ВЫВОДЫ

1. Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволило оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в аппаратах центробежного типа, а также создать методу оценки эффективности газопромывателя.

2. Выявлены расчетные комплексы, один из которых характеризует геометрию газопромывателя, а другой – его режимные параметры. Использование этих комплексов упрощает расчет и позволяет учитывать влияние ряда основных факторов.

3. Даны рекомендации по выбору средней осевой скорости в аппарате с учетом дисперсного состава пыли.

4. Разработанный метод может быть использован при расчете и конструировании аппаратов газоочистки, так как составляющие его соотношения определяют связь между технологическими характеристиками пылеуловителей и их геометрическими и режимными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Усманова Р. Р.** Патент 2339435 РФ, МПК, кл. В01 Д47/06 Динамический газопромыватель. Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.
2. **Барахтенко Г. М., Идельчик И. Е.** Влияние формы закручивающего устройства на гидравлическое сопротивление прямооточного циклона // Промышленная и санитарная очистка газов. 1974. № 6. С. 4–7.
3. **Страус В.** Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с.
4. **Шиляев М. И.** Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. гос. архит. строит. ун-та, 2003. 272 с.
5. **Лагуткин М. Г., Баранов Д. А.** Оценка действия силы Кориолиса в аппаратах с закрученным потоком // ТОХТ. 2004. № 1. С. 9–13.
6. **Дейч М. Е., Филиппов Г. А.** Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. 424 с.
7. **Старченко А. В., Бубенчиков А. М., Бурлуцкий Е. С.** Математическая модель неизотермического турбулентного течения газозвеси в трубе // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 1. С. 59–70.
8. **Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.** Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
9. **Безик Д. А.** Автоматизация расчета параметров циклона на основе математического моделирования процесса пылеулавливания: дисс. канд. техн. наук. Брянск: Брянская гос. инж.-технол. акад., 2000. 150 с.
10. Одномерная стохастическая модель движения частиц с переменными свойствами в газовом потоке / В. Е. Мизонов [и др.] // ТОХТ. 1994. Т. 28, № 3. С. 277–280.
11. **Литвинов А. Т.** Эффективная очистка газов в аппаратах, использующих для выделения частиц пыли из потока центробежную силу // Журнал прикладной химии. 1971. Т. 44, № 6. С. 1221–1231.

ОБ АВТОРАХ

Усманова Регина Равиловна, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер-механик (УГНТУ, 2000). Канд. техн. наук по МАХП (УГНТУ, 2004), (2009) Иссл. в обл. гидрогазодинамики в центробежных аппаратах.

Жернаков Владимир Сергеевич, проф., зав. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1992). Засл. деятель науки РФ, член-корр. АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.