

В.А. Успенский, В.Е. Кирпиченко

О ПРИЧИНАХ ПАДЕНИЯ ЭФФЕКТА РАЗДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ
В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ ВИХРЕВОГО НЕСУЩЕГО ПОТОКА

Принятые обозначения

r, x - координаты цилиндрической системы координат	c - концентрация аэрозоля, $\text{кг}/\text{м}^3$
W - осевая скорость газового потока, $\text{м}/\text{сек}$	c_0 - начальная концентрация аэрозоля, $\text{кг}/\text{м}^3$
ρ - массовая плотность несущей среды $\frac{\text{кг.сек}^2}{\text{м}^4}$	v_c - окружная скорость центра тяжести аэрозоля, $\text{м}/\text{сек}$
ρ_d - массовая плотность дисперсной среды, $\frac{\text{кг.сек}^2}{\text{м}^4}$	u - окружная скорость аэрозоля, $\text{м}/\text{сек}$
p - давление среды, $\text{Н}/\text{м}^2$	u_1, u_2 - окружные скорости диаметрально противоположных точек (по радиусу аппарата) аэрозоля, $\text{м}/\text{сек}$
ν_r - турбулентная кинематическая вязкость среды, $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$	ν - кинематическая вязкость среды, $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$
D_r - турбулентный коэффициент диффузии аэрозоля в несущей среде, $\frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$	R_c - радиус от оси вращения до центра тяжести аэрозоля, м
R - радиус аппарата	

Во многих случаях теоретически рассчитанный к.п.д. пылеулавливающего вихревого аппарата при его самом тщательном определении не совпадает достаточно надежно и удовлетворительно с экспериментально замеренным даже тогда, когда при экспериментировании были самым тщательным образом соблюдены все допущения, заложенные в аналитическую модель (монодисперсный состав, шарообразная форма, отсутствие коагуляции и дробления, малая концентрация пыли, исключая взаимное влияние частиц и т.п.) [1], [2].

Детальные изучения процесса улавливания пыли в вихревых инерционных аппаратах позволяют сделать ряд предложений о закономерностях отмеченного расхождения теории и эксперимента. Поскольку в центробежном поле рабочей полости вихревого аппарата у стенок аппарата собирается большое количество аэрозоля и удельная концентрация в пристеночном слое возрастает, то растет градиент концентрации по радиусу, что является причиной ухудшения эффекта отделения частиц вследствие возникновения движущей силы, препятствующей передвижению частиц к периферийным слоям. Перемещение частиц в турбулентном потоке внутри рабочей полости аппарата в данном случае можно описать как градиентную диффузию, происходящую со скоростью, определенной величиной градиента концентрации и коэффициентом турбулентной диффузии. Если предположить, что коэффициент турбулентной диффузии постоянен по радиусу, то задачу о нахождении скорости и величины потока концентрации можно решить аналитически. Течение в вихревом аппарате с большой степенью точности можно считать осесимметричным (особенно в том случае, если закрутка потока осуществляется лопаточным завихрителем или рассматривается на некотором расстоянии от входа газа).

Уравнение движения стационарного потока вязкого несжимаемого газа при отсутствии конвективных членов в цилиндрической системе координат будет иметь вид

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\nu_T r \frac{\partial w}{\partial r} \right); \quad (1)$$

а уравнение диффузии запишется

$$w \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_T r \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (2)$$

В уравнения (1), (2) введены количества ν_T и D_T , которые представляют собой величины коэффициентов турбулентной вязкости газового потока и диффузии аэрозоля в градиентном потоке концентрации какого-то вещества. Перейдем в системе уравнений (1), (2) к безразмерным переменным по правилу

$$z = \frac{x}{r}, \quad a = \frac{r}{R}; \quad w_0 = \frac{w}{w_{max}}; \quad c = \frac{c}{c_n}; \quad a_0 = \frac{r_0}{R} \quad (3)$$

и решим последовательно уравнения (1) и (2) для кольцевого источника пыли, находящегося на расстоянии a_0 и удовлетворяющего граничным условиям

$$D_T \frac{\partial c}{\partial a} = 0 \text{ при } a = 0, \quad a = 1. \quad (4)$$

В результате получим

$$c = 1 + \sum_{\lambda_n=0}^{\infty} \exp\left(-\lambda_n^2 \frac{z}{\kappa r}\right) \frac{I_0(\lambda_n a) I_0(\lambda_n a_0)}{I_0^2(\lambda_n)}. \quad (5)$$

Количество λ_n для определения из условия (4), которые сведены к решению уравнения

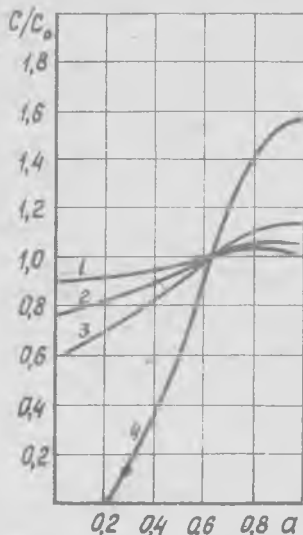
$$\frac{\partial}{\partial a} [I_0(\lambda_n a)]_{a=r} = 0; \quad K_r = \frac{W_0 R}{v_r}; \quad (6)$$

$$W_0 = \frac{\ell n a}{\ell n a_{max}} + \frac{1}{W_{max}} \left(\frac{\ell n a}{\ell n a_{max}} - 1 \right) \frac{R^2}{4\rho v_r} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{r^2}{W_{max} 4\rho v_r} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

Перепад давления, срабатываемый на аппарате, и относительный радиус (a_{max}), на котором реализуется максимальное значение осевой составляющей скорости вихревого течения, как и численное значение этой скорости (W_{max}) известны.

Распределение концентрации аэрозоля по радиусу вследствие градиентной диффузии на различных расстояниях от кольцевого источника представлено на рис.1 (C_0 - концентрация аэрозоля, осредненная по

всему объёму при полном смешении).



Р и с.1. Распределение концентрации аэрозоля:

1 - $x = 38R$; 2 - $x = 26R$

3 - $x = 16R$; 4 - $x = 8R$

Анализ рис.1 показывает, что на расстоянии 36-40 радиусов от источника пыли происходит практически полное её смешение с потоком, если источник пыли (как в нашем случае) расположен у стенки. Конечно, центробежные силы в вихревом аппарате препятствуют турбулентному диффузионному потоку пыли к центру (с этой целью и раскручивается поток), но при наличии большого количества мелкодисперсной пыли, до двух микрон (какой-то процент такой пыли почти всегда имеется в промышленных полидисперсных аэрозолях), описываемый процесс реализуется.

Пересечение всех кривых рис. I в одной точке ($\alpha = 0,62$) показывает, что для быстрого перемешивания частиц в центробежном потоке при градиентной диффузии кольцевой источник аэрозоля надо помещать на расстоянии относительно радиуса равного 0,62 от центральной оси. До сих пор речь шла о явлении турбулентной диффузии пыли, но сама задача возникла в результате работы над созданием вихревого энергоразделителя с пылеприемником для очистки доменного газа от пыли до остаточной запыленности $4-10 \text{ мг/м}^3$. Эти вихревые аппараты [2] имеют длину до 100 радиусов (для получения максимального энергоразделения потоков) и только внесение поправки на турбулентную диффузию помогло достаточно надежно определить к.п.д. аппарата, как пылеуловителя, теоретическими исследованиями [1] и экспериментально.

Ранее было замечено, что капли жидкости диаметром $0,26 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при концентрации в воздушном вихре, образованном струями газа (окружная скорость тангенциально вводимых струй - 318 м/сек , радиус аппарата - $6,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) имели скорость разделения на порядок меньшую, по сравнению со скоростью, рассчитанной обычным путем с привлечением закона сопротивления их движения по Стоксу. В другом эксперименте в медленном ламинарном вихревом потоке жидкости частицы диаметром $30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и плотностью, превышающей в 2,5 раза, плотность жидкости перемещались с окружной скоростью $0,3 \text{ м/сек}$ в аппарате радиусом $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и занимали всегда стабилизированное в радиальном направлении положение, т.е. вообще не сепарировались. Хорошо известно также, что характеристики вихревой центрифуги резко ухудшаются при уменьшении диаметра частиц до величины меньшей, чем $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Обычно такое ухудшение характеристик приписывается вторичным эффектам турбулентности и повторному захвату частиц, однако приведенные примеры как реально наблюдаемые расхождения объяснить отклонениями от закона Стокса, неустановившимися движениями частиц, турбулентностью нельзя. При проведении анализа процесса центробежного сепарирования можно отметить три эффекта, хорошо понимаемых и применяемых обычно за бесконечно малые, но возрастающих до ощутимых значений именно при сепарации очень мелких частиц: растет сила, направленная к центру и обусловленная градиентом давления; частица получает дополнительную скорость вращения по отношению к вихревому потоку; между несущей средой и дисперсной фазой возникает взаимодействие, вызванное силами вязкости, появляющихся вследствие раз-

ности скоростей диаметрально противоположных (по радиусу) точек частички. Возникающая циркуляция скорости жидкости, которая окружает частичку, может оказаться достаточной для индиферирования выталкивающей силы, пытающейся переместить аэрозоль к центру вихря. Это явление, обусловленное вязкостью, возникает в любом вихревом потоке, если окружные скорости растут к центру (как это имеет место, например, в потенциальном вихре).

Рассмотрим кубической формы частичку в равновесии под действием перепада давления, выраженного через скоростные напоры, и центробежной силы

$$(2z)^2 \left(\frac{\rho u_c^2}{2} - \frac{\rho u_g^2}{2} \right) = (2z)^3 \rho_g \frac{v_c^2}{R_c} \quad (7)$$

Поскольку $u_c = v_c$, а отношение скоростей в потенциальном потоке равно обратному отношению радиусов, то из формулы (7) получим

$$\frac{\rho}{\rho_g} = \left[1 - \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right]^2 \quad (8)$$

Следовательно, для радиального равновесия рассматриваемой взвеси необходимо, чтобы плотность её была выше, чем плотность несущего потока. Возникшей на аэрозоле и прилипшей к нему части жидкости перепад давления передает поток жидкости на частичку и сила его воздействия на нее может быть записана как

$$6\pi \nu \rho \Delta v z = \frac{1}{2} (z^*)^2 \pi \rho (\Delta v)^2, \quad (9)$$

где z^* - радиус эквивалентной частички, которая включает в себя и аэрозоль и часть охватывающей его жидкости;

Δv - разность скоростей несущей среды и дисперсной фазы.

Будем считать, что разность скоростей пропорциональная перепаду окружных скоростей

$$\Delta v = \frac{du}{dR} z \kappa = \frac{u}{R} z \kappa, \quad (10)$$

тогда

$$z^* = R \left(\frac{12}{\kappa R_{er}} \right)^{1/2}; \quad R_{er} = \frac{uR}{\nu} \quad (11)$$

Воспользовавшись выражением (8) перепишем (11) в виде

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{12}{\kappa R_{er}} \right)^2, \quad (12)$$

где

$$\rho^* = \frac{\rho_g v_g - \rho (v_g^* - v_g)}{v_g^*};$$

v_g^* - эквивалентный объём.

После некоторых простейших преобразований получим

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + \left(\frac{z}{R}\right)^3 \left(\frac{R}{z^*}\right)^3 \left(\frac{\rho_g}{\rho} - 1\right). \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12) найдем выражение для минимально необходимого отношения плотностей дисперсной фазы и несущей среды, при котором наступит радиальное равновесие

$$\left(\frac{\rho_g}{\rho}\right)_{\min} = 1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2 \left(\frac{12}{\kappa R_{er}}\right)^{2/3} \left[\frac{2 - \frac{12}{\kappa R_{em}}}{1 - \frac{12}{(\kappa R_{em})^2}} \right] \quad (14)$$

Использование экспериментальных данных показало, что коэффициент пропорциональности κ должен быть равным приблизительно трём. Расчеты по формуле (13) показывают, что в отдельных случаях минимальное отношение плотностей колеблется от 200 до 2280 и более. Следовательно, рассмотренные явления возникновения сил, препятствующих передвижению аэрозоля в вихревом потоке по радиусу от центральной оси вращения, могут быть причиной того, что в некоторых случаях не наблюдается предварительного соблюдения расчетного и экспериментального значения к.п.д. пылеулавливающих и сепарирующих аппаратов. Выражение (14) позволяет проверить в каждом конкретном случае не проявляется ли рассмотренный выше эффект в исследуемом аппарате.

Л и т е р а т у р а

1. Успенский В.А. и др. К расчету вихревого пылеулавливающего аппарата. ИФЖ, т.18 № 3, 1970.

2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М., Машгиз, 1969.

В.И. Лукьянов, Р.З. Алимов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ СТЕРЖНЯ,
РАСПОЛОЖЕННОГО В ПРИОСЕВОЙ ЗОНЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

Цель данной работы - выяснение экспериментальным путем некоторых закономерностей теплоотдачи от тонкого стержня (проволоки), помещенного на оси закрученного потока воздуха.