

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОКРОГО ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ВИХРЕВОМ СКРУББЕРЕ

Б.С. САЖИН, М.П. ТЮРИН, М.Б. САЖИНА, Л.М. КОЧЕТОВ, М.А. АПАНУШКИНА, О.В. ПЛАТОНОВА

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина,
Всероссийский заочный институт текстильной и легкой промышленности)

E-mail: office@msta.ac.ru, office@roszitlp.ru

Приведены результаты исследования процесса мокрого пылеулавливания в вихревом скруббере и получено численное решение системы уравнений для определения распределения скоростей и статического давления газового потока в данном аппарате.

Results of the research of the wet dust separating process in a vortical scrubber are shown, and the numerical decision of the equations system for the determination of speeds distribution and static gas torrent pressure in the given apparatus is received.

Ключевые слова: мокрое пылеулавливание, вихревой скруббер, движение газа, статическое давление, векторы скоростей.

Для улавливания текстильных наноразмерных пылей целесообразно применение вихревых скрубберов с мокрым пылеулавливанием. Большое значение при исследовании процессов в вихревом скруббере имеет знание параметров движения газа, которое позволяет оценить эффек-

тивность процессов мокрого пылеулавливания и утилизации теплоты.

Математическая модель движения газа в аппарате основана на решении системы уравнений Навье-Стокса для осесимметричной задачи и уравнения неразрывности:

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (r\rho v_r v_z) \right] = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_T \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_T \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial r} - \mu_T \frac{\rho v_r}{r^2} + \frac{\rho v_\varphi^2}{r}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_\varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (r\rho v_z v_\varphi) \right] = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_T \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_T \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right) \right] - \mu_T \frac{\rho v_\varphi}{r^2} - \frac{\rho v_\varphi v_r}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (r\rho v_z v_z) \right] = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_T \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu_T \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{\rho \vec{v}} = 0, \quad (4)$$

где v_z – скорость потока вдоль оси Z ; v_r – скорость потока в радиальном направлении; v_φ – тангенциальная скорость потока; ρ – плотность смеси; μ_T – коэффициент турбулентной вязкости; P – давление; \vec{v} – вектор скорости.

Для системы уравнений (1)...(4) использовались следующие граничные условия:

– постоянство задаваемой скорости потока на входе в аппарат;

– постоянство задаваемой скорости потока при выходе из аппарата;

– равенство нулю скоростей на стенке аппарата по всей его длине (условие прилипания).

Для моделирования турбулентности использовалась k - ϵ модель, для которой

решаются два дополнительных уравнения переноса: для определения k – турбулентной кинетической энергии и для определения ε – турбулентной энергии диссипации. При этом предполагается изотропность турбулентной вязкости.

Коэффициент турбулентной вязкости, являющийся характеристикой потока, вычисляется по формуле Колмогорова-Прандтля как функция параметров турбу-

лентности – кинетической энергии и скорости ее диссипации:

$$\mu_T = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Решение системы уравнений совместно с граничными условиями было реализовано численным методом на ЭВМ.

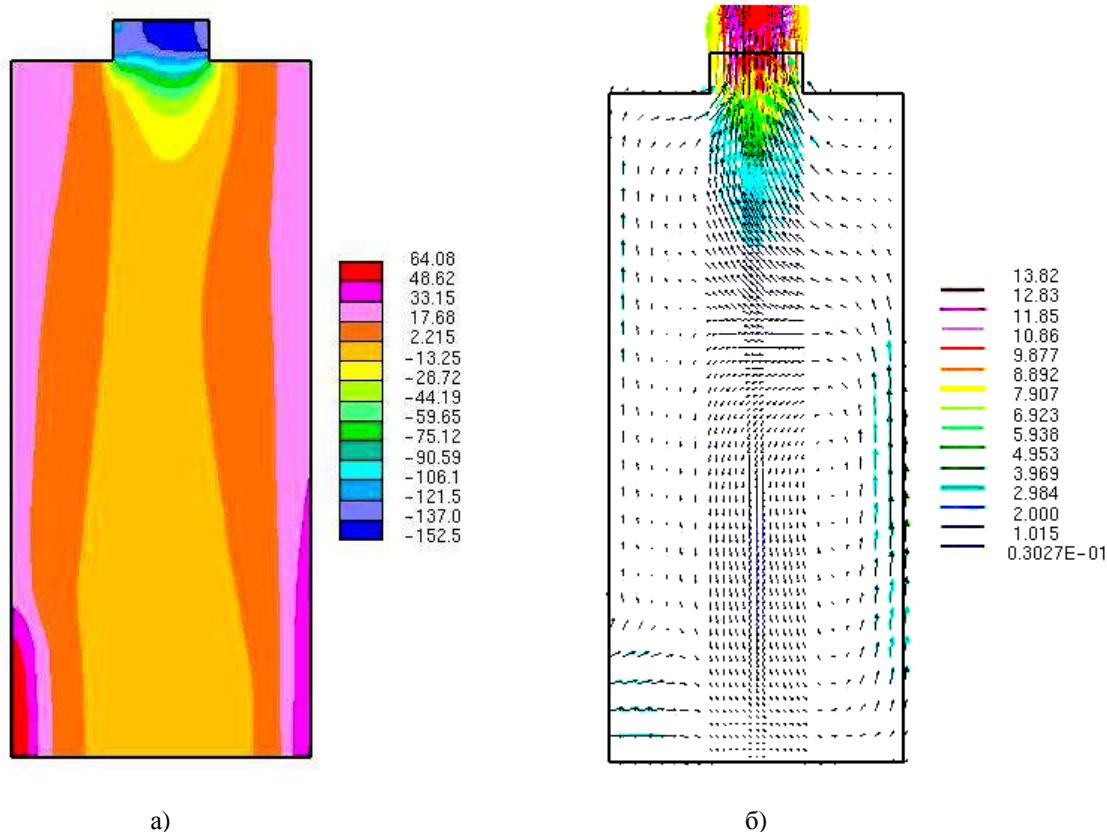


Рис. 1

На рис. 1 изображены результаты численного расчета распределения составляющих скоростей газовых потоков в аппарате: а) – статическая составляющая давления (продольный разрез); б) – проекция вектора скорости (продольный разрез).

Из рис. 1 видно, что гидравлическое сопротивление аппарата составляет около 215 Па, что хорошо согласуется с опытными данными. Полученные результаты мо-

гут быть распространены и на другие аналогичные аппараты.

Рассчитанные поля скоростей и статического давления позволяют определить конструктивные особенности аппарата и наиболее выгодное расположение орошающих форсунок с целью получения максимальной эффективности пылеулавливания.

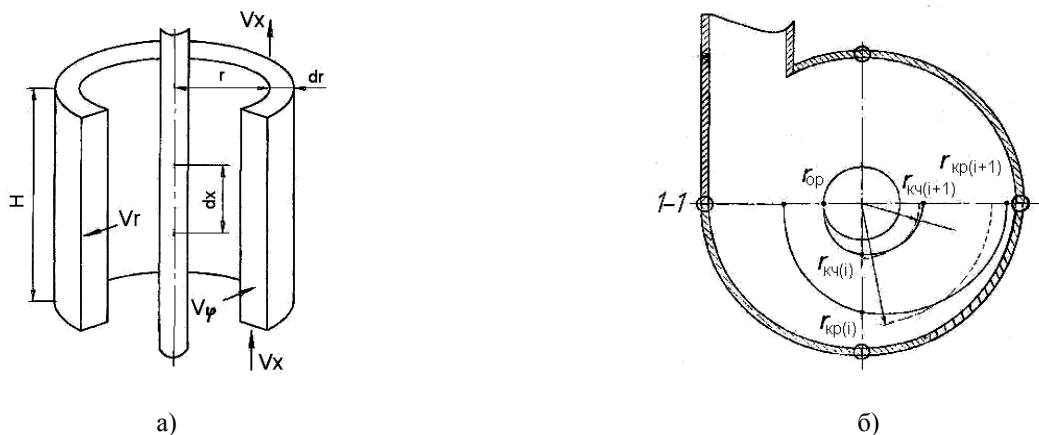


Рис. 2

При исследовании процесса осаждения частиц пыли на каплях воды при их движении в газовом потоке из расчета исключались частицы, которые должны полностью уловиться за счет центробежных сил. То есть при расчете было положено, что частицы пыли, находящиеся на радиусе от $r_{кр}$ до R (рис. 2 – расчетные схемы: а) – поперечное сечение; б) – продольный разрез), уловятся за счет центробежной силы и их из расчета можно исключить, а частицы пыли, находящиеся на радиусе от $r_{кч}$ до $r_{кр}$, могут уловиться только за счет осаждения на каплях. Таким образом, расчет сводится только к определению количества пыли, не уловившейся в аппарате за счет осаждения на каплях на радиусе от $r_{кч}$ до $r_{кр}$.

При расчете предполагаем, что осаждение твердых частиц на каплях жидкости происходит за счет трех механизмов: инерционное соударение, перехват и диффузия. Суммарная эффективность осаждения на одиночной капле рассчитывается по формуле:

$$\eta_{ос} = 1 - (1 - \eta_{ис})(1 - \eta_{п})(1 - \eta_{д}), \quad (6)$$

где $\eta_{ис}, \eta_{п}, \eta_{д}$ – эффективность пылеулавливания от инерционного соударения, перехвата и диффузии.

Эффективность пылеулавливания от инерционного соударения при $Stk > 0,1$:

$$\eta_{ис} = Stk^2 / (Stk + 0,35)^2, \quad (7)$$

где Stk – критерий Стокса.

Эффективность от перехвата при $R \ll 1$:

$$\eta_{п} = (1 + R)^2 - 1 / (1 + R) \approx 3R, \quad (8)$$

где $R = d_{ч} / d_{к}$.

Эффективность от диффузионного осаждения:

$$\eta_{д} = \frac{4}{Pe} (2 + 0,557 Re^{1/2} Sc^{3/8}), \quad (9)$$

где Pe – критерий Пекле; Sc – критерий Шмидта.

При расчете принимаем, что началом отсчета движения твердых частиц является плоскость 1-1; также считаем, что частицы пыли по сечению этой плоскости распределены равномерно.

Поскольку пыль поступает в аппарат по всей высоте закручивающего устройства, разделим плоскость 1-1 на участки высотой $\Delta h_{ни}$ таким образом, чтобы разница в расходах газа верха и низа участка $\Delta h_{ни}$ не превышала 10%.

Количество пыли, поступившее на участок $\Delta h_{ни}$:

$$m_{вх} = z_{вх} \Delta G_{ни}, \quad (10)$$

где $z_{вх}$ – концентрация пыли на входе в аппарат, $\Delta G_{ни}$ – разница в расходах газа верха и низа рассматриваемого участка.

Количество пыли, находящееся на радиусе от r_{op} до $r_{кр}$:

$$m_{вх_i} = m_{вх} \frac{G_{кап}}{G_{п}}, \quad (11)$$

где $G_{п}$ – полный расход газа на рассматриваемом участке; $G_{кап}$ – расход газа на участке, ограниченном радиусами $r_{кр}$ и r_{op} ($r_{кч}$).

Для определения количества пыли, поступившей на участок $\Delta h_{ни}$ и неуловившееся на каплях, необходимо установить, как изменяется концентрация пыли по ходу движения частиц.

Для этого разделим закручивающее устройство вертикальными плоскостями. В каждой зоне, ограниченной вертикальными плоскостями и траекториями частиц, предполагаем, что профиль скорости не меняется по высоте и по окружности.

Для определения эффективности улавливания твердых частиц определенного диаметра каплями жидкости, находящихся в зоне орошения, выделим на оросителе участок высотой dx и элементарный объем в виде кольца радиусом r , толщиной dr и высотой H ($H \gg dx$). Концентрация пыли на входе в элементарный объем z_1 , а на выходе z_2 .

Расход газа в элементарном объеме:

$$dG = 2\pi V_x r dr. \quad (12)$$

Расход жидкости:

$$dL = L dx / h_{op}. \quad (13)$$

Число капель, проходящих через рассматриваемый объем в единицу времени:

$$N = \frac{dL}{V_{к.ср}} = \frac{L dx}{h_{op} V_{к.ср}}. \quad (14)$$

Средний объем капель с учетом распределения капель по размерам:

$$V_{к.ср} = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} d_k^3 P(d) dd_k, \quad (15)$$

где $P(d)$ — функция плотности распределения капель по размерам.

Число капель с диаметром d_k , находящихся в элементарном объеме:

$$n = \frac{NP(d) dd_k dr}{W_r} = \frac{LP(d) dx dr dd_k}{h_{op} V_{к.ср} W_r}. \quad (16)$$

Лобовая поверхность капель диаметра d_k :

$$S = n \frac{\pi d_k^2}{4} = \frac{\pi LP(d) d_k^2 dx dr dd_k}{4 h_{op} V_{к.ср} W_r}. \quad (17)$$

Количество пыли, оседающей на каплях жидкости диаметром d_k в единицу времени:

$$m_k = z \eta_{oc} S V_{oc}, \quad (18)$$

где V_{oc} – скорость осаждения частиц пыли на каплях жидкости диаметром d_k , представляющая собой относительную скорость частиц пыли и капель жидкости:

$$V_{oc} = \sqrt{(U_r - W_r)^2 + (U_{\phi} - W_{\phi})^2 + (U_x - W_x)^2}. \quad (19)$$

Общее количество пыли, оседающей на всех каплях, находящихся в элементарном объеме:

$$m = \int_0^{\infty} z \eta_{oc} V_{oc} \frac{\pi LP(d) d_k^2 dx dr dd_k}{4 h_{op} V_{к.ср} W_r}. \quad (20)$$

С другой стороны, из уравнения материального баланса по пыли для рассматриваемого элементарного объема:

$$m = 2\pi r z V_x dr - 2\pi r (z - dz) V_x dr. \quad (21)$$

Приравнявая правые части уравнений (20), (21), получаем:

$$2\pi r dz V_x dr = \frac{\pi z L}{4h_{op} V_{k.cp}} \left[\int_0^\infty \frac{V_{oc} \eta_{oc} d_k^2 P(d) dd_k}{W_r} \right] dx dr. \quad (22)$$

Откуда

$$\frac{dz}{z} = \frac{L}{8h_{op} r V_{k.cp} V_x} \left[\int_0^\infty \frac{V_{oc} \eta_{oc} d_k^2 P(d) dd_k}{W_r} \right] dx. \quad (23)$$

Интегрируя уравнение (23), получаем:

$$\ln \frac{z_2}{z_1} = \frac{1}{8h_{op} r} \int_{x_1}^{x_2} \frac{L}{V_{k.cp} V_x} \left[\int_0^\infty \frac{V_{oc} \eta_{oc} d_k^2 P(d) dd_k}{W_r} \right] dx. \quad (24)$$

Пределы интегрирования

$$x_1 = \frac{h_{кч(i)} + h_{кп(i)}}{2}; \quad x_2 = \frac{h_{кч(i+1)} + h_{кп(i+1)}}{2}. \quad (25)$$

Откуда

$$z_2 = z_1 \exp \left(\frac{1}{8h_{op} r} \int_{x_1}^{x_2} \frac{L}{V_{k.cp} V_x} \left[\int_0^\infty \frac{V_{oc} \eta_{oc} d_k^2 P(d) dd_k}{W_r} \right] dx \right). \quad (26)$$

Конечная концентрация пыли:

$$z_{Ki} = \frac{2\pi}{G_{кап}} \int_{r_1}^{r_2} z_2 V_x r dr. \quad (27)$$

Пределы интегрирования:

$$r_1 = \frac{r_{кч(i)} + r_{кп(i)}}{2}; r_2 = \frac{r_{кч(i+1)} + r_{кп(i+1)}}{2}. \quad (28)$$

Начальные условия при решении уравнения (27): при $\tau = 0$; $x = h_H$; $r = r_H$; $d_k = 0,05$ мм.

Расчет заканчивался при соблюдении условий:

$$x = h_{op}; r = R; d_k = 2 \text{ мм}.$$

Уравнение (26) решается численным методом совместно с уравнениями движе-

ния частиц и капель, используя полученные расчетные зависимости по V_ϕ, V_x, V_r :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_r}{dt} &= \frac{U_\phi^2}{r} + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_r - U_r) \xi_q, \frac{dr}{dt} = U_r, \\ \frac{dU_\phi}{dt} &= \frac{U_\phi U_r}{r} + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_\phi - U_\phi) \xi_q, \frac{d\phi}{dt} = \frac{U_\phi}{r}, \\ \frac{dU_x}{dt} &= g + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_x - U_x) \xi_q, \frac{dx}{dt} = U_x, \end{aligned} \right\} (29)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{dt} &= \frac{W_\phi^2}{r} + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_r - W_r) \xi_q, \frac{dr}{dt} = W_r, \\ \frac{dW_\phi}{dt} &= \frac{W_\phi W_r}{r} + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_\phi - W_\phi) \xi_q, \frac{d\phi}{dt} = \frac{W_\phi}{r}, \\ \frac{dW_x}{dt} &= g + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_q d_q} (v_x - W_x) \xi_q, \frac{dx}{dt} = W_x. \end{aligned} \right\} (30)$$

Крайевые условия при решении уравнений при $\tau = 0$:

$$W_{го} = W_{ист}; W_{фо} = 0; W_{хо} = 0;$$

$$U_{\varphi} = v_{\varphi}; U_x = v_x; U_r = 0; r = r_H; x = h_H.$$

$$m_{\text{ВЫХ}_i} = z_{Ki} \Delta G_{ni} \frac{G_{\text{кап}}}{G_{\Pi}}, \quad (31)$$

$$m_{\text{ВЫХ}} = \sum m_{\text{ВЫХ}_i}. \quad (32)$$

Эффективность пылеулавливания:

$$\eta = 1 - \frac{m_{\text{ВЫХ}}}{m_{\text{ВХ.П}}}. \quad (33)$$

При решении системы уравнений (29), (30) предполагаем, что частицы имеют сферическую форму; на частицу действуют сила сопротивления среды – центробежная сила и сила тяжести.

Количество пыли, поступившей на участок Δh_{ni} и не уловившейся в факеле орошения:

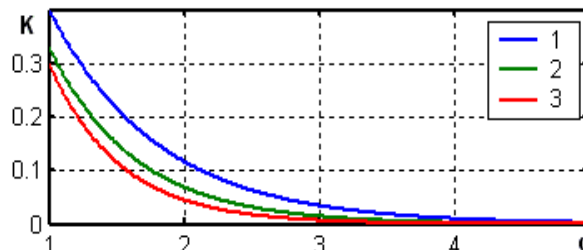
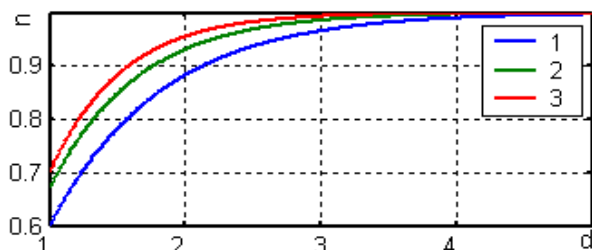


Рис. 3

На рис. 3 представлены графические зависимости фракционной эффективности пылеулавливания η и коэффициента проскока k от эффективного диаметра частиц при $v_{x, \text{ср}} = 15 \text{ м/с}$: 1 – $L/G=0,4$; 2 – $L/G = 0,6$; 3 – $L/G = 0,8$.

ВЫВОДЫ

1. Получено численное решение уравнения Навье-Стокса применительно к вихревому скрубберу.

2. Приведены распределения статического давления и векторов скоростей по объему аппарата.

3. Получены численные решения фракционной и суммарной эффективности улавливания фосфатной пыли в вихревом аппарате.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности МГТУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 09.04.10.