

1. Вейцер Ю.И., Колобова З.А., Сафонова Г.М. Влияние знака электрического заряда загрузки и взвешенных веществ на процесс фильтрования // Научные труды АКХ. Т. 97. – М.: ОНТИ АКХ, 1974. – С. 33 – 42.

2. Санников В.А. Исследование процессов осветления вод при использовании новых фильтрующих материалов и флокулянтов: Дис. ... канд. хим. наук. – Новосибирск, 1974. – 165 с.

3. Благодарная Г.И. Повышение фильтрующей способности кварцевой загрузки фильтра при обработке его активированным раствором флокулянта // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 36. – К.: Техніка, 2001. – С. 279-283.

Получено 29.08.2002

УДК 66.074.1 (088.8)

Е.В. УСПЕНСКИЙ

СВНЦ НАН Украины, г. Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО КАПЛЕУЛОВИТЕЛЯ

Описываются конструкция и принцип действия вихревого каплеуловителя. Предложена формула для расчета эффективности работы каплеуловителя данной конструкции.

Широко применяющийся в технике пылеулавливания вихревой турбулентный промыватель [1-4] содержит вихревой каплеуловитель (рис. 1). В область А, заключенную в плоскую круглую (в плане) раздаточную камеру 1, поступает вихревой дисперсный поток, состоящий из сплошной газовой среды и дисперсной фазы – капель жидкости. Вихревой газовый поток вращает лопаточный стабилизатор 2, представляющий собой конструкцию типа "беличьего колеса", закрытого с одной стороны диафрагмой 3, имеющего ось 4, закрепленную в подшипнике 5, установленном на камере 1. При движении вихревого дисперсного потока в цилиндрическом корпусе 6 каплеуло-

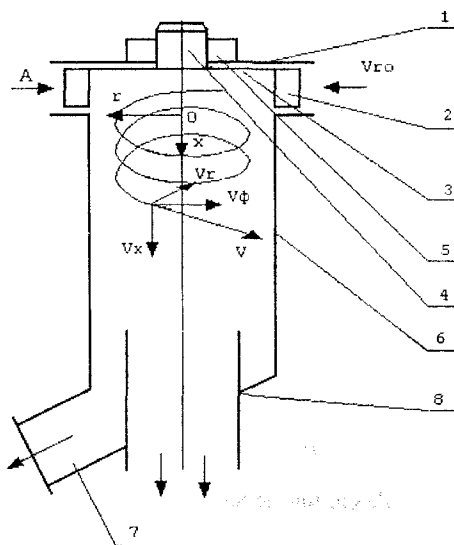


Рис. 1 – Схема конструкции вихревого каплеуловителя

вителя капли жидкости центробежными силами отбрасываются на стенку каплеуловителя, образуя пленку, которая стекает вниз и выводится через патрубок 7. Осушенный газ через выходное устройство 8 покидает аппарат.

Уравнения осесимметричного стационарного движения вихревого течения в цилиндрической системе координат и уравнение неразрывности рассматриваемого потока запишем в виде

$$V_x \frac{\partial V_r}{\partial x} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + v_\tau \left[\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r^2} \right]; \quad (1)$$

$$V_x \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = v_\tau \left[\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right]; \quad (2)$$

$$V_r \frac{\partial V_x}{\partial r} = v_\tau \cdot \left[\frac{\partial^2 V_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial r} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_x}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (1)-(3) принято, что $V_r \ll V_x$; $V_r \ll V_\varphi$;

$\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial r}$; $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$. В рассматриваемом потоке имеет место радиальное

равновесие, т.е. $\frac{V_\varphi^2}{r} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}$. Решение уравнения (1) будем искать в

виде

$$V_r = \psi(r) \cdot f(x). \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в уравнение (1), получим

$$\psi'' \cdot f + \frac{1}{r} \cdot \psi' \cdot f - \frac{1}{r^2} \cdot \psi \cdot f - \frac{V_x}{v_\tau} \cdot \psi \cdot f' = 0. \quad (6)$$

Разделив переменные, перепишем уравнение (6):

$$\psi'' + \frac{1}{r} \psi' + \left(\lambda - \frac{1}{r^2} \right) \cdot \psi = 0; \quad (7)$$

$$f' - \frac{v_\tau}{V_x} \cdot \lambda \cdot f = 0 \quad (8)$$

(штрих – это производная по соответствующей координате). Решение уравнения (7) известно и может быть записано следующим образом [5]:

$$\psi = C_1 \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r) + C_2 \cdot N_1(\sqrt{\lambda}; r), \quad (9)$$

а решение уравнения (8) представим в виде

$$f = C_3 \cdot \exp\left(\int \frac{V_\tau \cdot \lambda}{V_x} dx\right). \quad (10)$$

Константы интегрирования найдем из граничных условий при $x=0$; $r=R$; $V_r = V_{0r}$; $r = r_i$; $V_r = V_{ri}$;

$$C_1 = \frac{V_{0r}}{I_1(\sqrt{\lambda}; r)} + \frac{V_i - \frac{V_{0r} \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)}}{\frac{N_1(\sqrt{\lambda}; R) \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)} - N_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}$$

$$C_2 = \frac{V_i - \frac{V_{0r} \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)}}{\frac{N_1(\sqrt{\lambda}; R) \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)} - N_1(\sqrt{\lambda}; r_i)}$$

$$V_r = C_3 \cdot [C_1 \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; r) + C_2 \cdot N_1(\sqrt{\lambda}; r)] \exp\left(\int \frac{V_\tau \cdot \lambda}{V_x} dx\right). \quad (11)$$

Решение уравнения (2) выполним аналогично предыдущему:

$$V_\varphi = C_4 \cdot I_4(\sqrt{\lambda}; r) + C_5 \cdot N_1(\sqrt{\lambda}; r) \cdot C_6 \exp\left(\int \frac{V_\tau \cdot \lambda}{V_x} dx\right) \quad (12)$$

при $x=0$, $r=R$, $V_\varphi = V_{0\varphi}$ и при $r=0,5R$; $V_\varphi = 0,5 \cdot V_{0\varphi}$

(в области стабилизатора и на входе в каплеуловитель вихревой поток вращается как квазитвердое тело).

$$C_4 = \frac{V_{0\varphi}}{I_1(\sqrt{\lambda}; r)} + V_{0\varphi} \cdot \left[\frac{\frac{1}{r} - \frac{I_1(\sqrt{\lambda}; 0,5R)}{I(\sqrt{\lambda}; R)}}{\frac{N_1(\sqrt{\lambda}; R) \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; 0,5R)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)} - N_1(\sqrt{\lambda}; 0,5R)} \right]; \quad (13)$$

$$C_5 = \frac{V_{0\varphi} \left(\frac{1}{r} - \frac{I_1(\sqrt{\lambda}; 0.5R)}{I_1(\sqrt{\lambda}; R)} \right)}{N_1(\sqrt{\lambda}; R) \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; 0.5R) - N_1(\sqrt{\lambda}; 0.5R) I_1(\sqrt{\lambda}; R)} \quad (14)$$

Из условия $x=0$; $r=0,3R$; $V_\varphi = 0,3V_{0\varphi}$ находим $\lambda=0,36$.

Из граничных условий $x=L$; $r=R$; $V_r = V_{r1}$; $V_\varphi = V_{\varphi1}$ определим

$$C_3 = \frac{V_{r1} \cdot \exp\left(\int \frac{v_r \cdot \lambda}{V_x} dx\right)}{C_1 \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; R) + C_2 N_1(\sqrt{\lambda}; R)}; \quad C_4 = \frac{V_{\varphi1} \cdot \exp\left(\int \frac{v_r \cdot \lambda}{V_x} dx\right)}{C_4 \cdot I_1(\sqrt{\lambda}; R) + C_5 N_1(\sqrt{\lambda}; R)}$$

В уравнении (3) выполним замену по правилу

$$\frac{\partial V_x}{\partial r} = y, \quad (15)$$

что приводит к понижению порядка уравнения (3) на единицу и общее решение его может быть записано так:

$$V_x = \int C_7 \cdot \exp\left(\frac{V_r}{v_r} - \frac{1}{r}\right) dr + C_8 \quad (16)$$

при $r=0$; $V_x = V_{x\max}$ и $C_8 = V_{x\max}$.

При практическом применении формул (11) и (12) количество V_x может быть заменено на величину средней расходной скорости с последующим уточнением. Осевая составляющая потока на половине радиуса обычно составляет две трети от расходной. Воспользовавшись этим условием, найдем константу C_7 и уравнение (16) перепишем в виде

$$V_x = V_{x\max} \cdot \left(1 - \frac{I(r)}{I(0,5R)} + \frac{8Q}{3\pi R^2} \cdot \frac{I(r)}{I(0,5R)} \right), \quad (17)$$

где $I(r)$ – интеграл из уравнения (16), $I(0,5R)$ – значение этого же интеграла при $r=0,5R$.

Формулу для расчета эффективности каплеуловителя получим из следующих соображений. Допустим, что вся влага, содержащаяся в газе на выходе из каплеуловителя, находится в цилиндре, объем которого соответствует исходному содержанию жидкости в газе, располо-

женном соосно в цилиндрической полости каплеуловителя. Тогда

$$\eta = 1 - \frac{\pi l_y^2 \cdot L \cdot G_H}{\pi \cdot d^2 \cdot D \cdot G_H} = 1 - \left(\frac{l_y}{D} \right)^2. \quad (18)$$

Время движения капли жидкости от центра аппарата до его стенки должно быть равно времени пребывания капли в аппарате, т.е.

$$\frac{D - l_y}{2W_r} = \frac{L}{W_x}. \quad (19)$$

Исключив l_y из (18) и (19), получим:

$$\eta = \frac{2L \cdot W_r}{D \cdot W_x} \cdot \left(2 - \frac{2L \cdot W_r}{D \cdot W_x} \right). \quad (20)$$

Функция (20) имеет экстремум по комплексу входящих параметров и достигает максимального значения, равного единице, при

$$\frac{2L \cdot W_r}{D \cdot W_x} = 1. \quad (21)$$

Запишем уравнение движения капли переменной массы в вихревом несущем потоке в проекции на радиус при действии центробежных, гидродинамических и массовых сил с учетом присоединенной массы:

$$\frac{d}{dt}(m_{жс} \cdot W_r) - \frac{1}{12} \pi d^2 \rho \cdot \frac{dW_r}{dt} = \theta \cdot m_{жс} \cdot \frac{V_\varphi^2}{r} - \frac{1}{6} \pi d^3 \rho \frac{V_\varphi^2}{r} - C_x \cdot \frac{\rho(W_r - V_r)}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}. \quad (22)$$

При заданном законе изменения диаметра капли во времени $d = d_0(1 + \tau t)$ уравнение (22) может быть решено в виде [5]:

$$W_r = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right) \cdot d_0 \tau}{\frac{3}{4} C_x \frac{\rho}{\rho_{жс}} \left[C_9 I_p(\beta; \sqrt{y}) + C_{10} N_p(\beta; \sqrt{y}) \right]}, \quad (23)$$

где I_p и N_p — функции Бесселя и Неймана порядка p ; $y = 1 + \tau t$.

$$\beta = \left(3C_x \frac{\rho}{\rho_{жс}} N_r \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right) \cdot \tau^2 d_0^2};$$

$$p = 3C_x \frac{\rho}{\rho_{жс}} \cdot \frac{\left(\theta - \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right) \cdot V_{\varphi}}{\left(1 - \frac{\rho}{2\rho_{жс}} \right) \cdot \tau^2 d_0^2};$$

$$C_9 = \frac{\frac{4}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right) \cdot d_0 \tau \cdot \frac{N_p(0,5\beta)}{I_p(0,5\beta)}}{C_x \frac{\rho}{\rho_{жс}} W_{r1} \cdot \left[N_p(0,5\beta; \sqrt{y}) - \frac{N_p(0,5\beta) \cdot I_p(0,5\beta; \sqrt{y})}{I_p(0,5\beta)} \right]}$$

$$C_{10} = \frac{\frac{4}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right) \cdot d_0 \tau}{C_x \frac{\rho}{\rho_{жс}} W_{r1} \cdot \left[N_p(0,5\beta; \sqrt{y}) - \frac{N_p(0,5\beta) \cdot I_p(0,5\beta; \sqrt{y})}{I_p(0,5\beta)} \right]}$$

При нахождении констант интегрирования были использованы начальные условия: при $t=0$ $W_r=0$; при $t=t_1$, $W_r=W_{r1}$.

В выражение (23) входят тангенциальная и радиальная составляющие скорости газового потока, определяемые по формулам (11) и (12), содержащие радиус как переменную величину. Поэтому при использовании выражения (23) необходимо в каждой точке последовательно находить скорость в разное время, что связано с большим объемом вычислительной работы, или брать среднее значение скорости, интегрируя (11) и (12) по радиусу, как и было сделано в настоящей работе. Формулы (11), (12), (17), (20) и (23) были проверены экспериментально на системе воздух-вода при нормальных условиях. На рис.2 представлена зависимость V_r , V_{φ} , V_x от отношения r/R . Результаты замеров показаны значками, а сплошные линии построены по формулам (11), (12), (17).

На рис.3 приведены значения радиальной составляющей скорости капель при различных интенсивностях изменения диаметра. Скорость капель непосредственно измерить не удалось, графики нанесены по расчетным данным, выполненным по формуле (23).

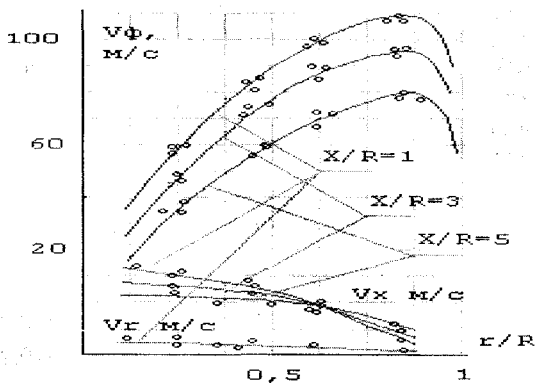


Рис. 2 – Эпюры радиальной (V_r), осевой (V_x) и тангенциальной (V_ϕ) составляющих скорости газа по радиусу каплеуловителя в трех сечениях

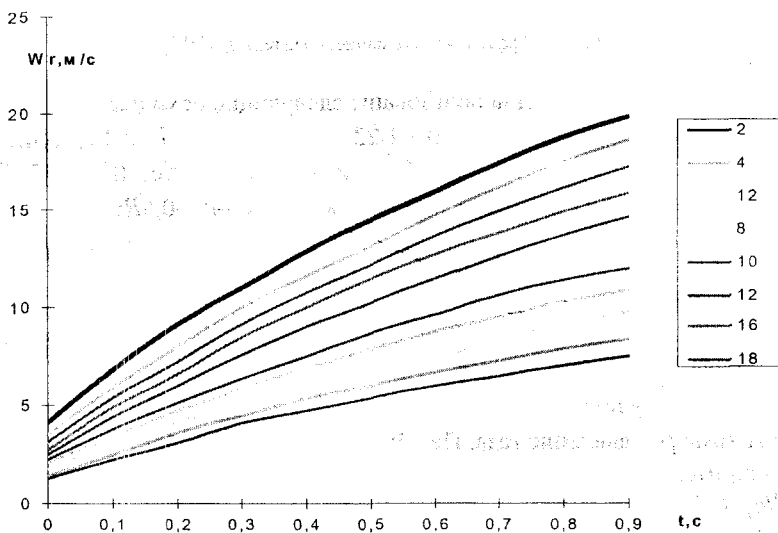


Рис.3 – Радиальная составляющая (W_r) скорости движения капли с течением времени (t) при различной интенсивности роста капель во времени (τ)

На рис.4 представлены значения эффективности каплеуловителя в зависимости от перепада давления, срабатываемого в лопаточном

завихрителе при разном удельном орошении газа водой. Следует отметить, что для улавливания капель нет необходимости в срабатывании такого большого перепада давления. Но дело здесь в том, что такой перепад нужен для очистки газа от мелкодисперсной (до 1 мкм) пыли и поступающий в каплеуловитель вихревой поток уже существует, а каплеулавливание реализуется за счет некоторой утилизации затраченной энергии.

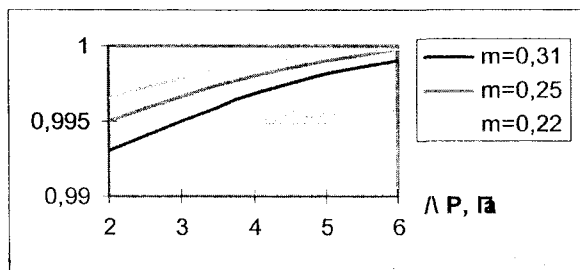


Рис.4 – Эффективность каплеуловителя $\eta(\Delta P; k)$

При расчетах были использованы следующие исходные данные:
 $d_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho_{жс} = 1000$ кг/м³; $\rho = 1,22$ кг/м³; $\theta = 0,91$; $L = 2,2R$; $R = 0,1$ м;
 $W_x = 11$; $C_x = 0,41$; $\nu_t = 2,04 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\nu = 11,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $W_{r1} = 0,2 V_{0r}$;
 $V_{0r} = 6,8$ м/с; $V_{0\phi} = 70$ м/с; $V_{\phi 1} = 0,2 V_{0\phi}$; $r_i = r = 0,5R$; $t_1 = 0,01$ с;
 $V_{r1} = 0,35 V_{0r}$.

Принятые условные обозначения:

C_x – коэффициент лобового сопротивления капли при радиальном движении в газе; D – диаметр каплеуловителя, м; d_0 – начальный диаметр капли, мкм; k – удельное весовое содержание капель в газе; L – высота каплеуловителя, м; $m_{жс}$ – удельное орошение газа жидкостью, кг/кг газа; p – давление газа, Па; Δp – перепад давления на лопаточном завихрителе, Па; Q – секундный расход газа через каплеуловитель, м³/с; R – радиус каплеуловителя, м; r – текущая координата; t – время, с; V_r, V_x, V_ϕ – радиальная, осевая и тангенциальная составляющие скорости вихревого потока соответственно, м/с; W_r, W_x – радиальная и осевая составляющие скорости движения капли, м/с; x – текущая координата; θ – коэффициент скольжения капель относительно газа в тангенциальном движении; η – эффективность каплеулавливания; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; ν_t – турбулентная вязкость газа, м²/с;

ρ – плотность газа, кг/м^3 ; $\rho_{\text{жс}}$ – плотность жидкости, кг/м^3 ; τ – коэффициент интенсивности роста капли во времени.

Все измерения выполняли по стандартной методике [6].

1. Ларин Ю.К. и др. А.с. 560630, Б.И. 21, 1977.

2. Ларин Ю.К. и др. А.с. 547120, Б.И. 8, 1978.

3. Успенский Е.В., Привалов В.В. А.с. 1102112, Б.И. 25, 1984.

4. Успенский Е.В. и др. А.с. 1123133, Б.И. 41, 1984.

5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1965. – 704 с.

6. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 269 с.

Получено 02.09.2002

УДК 628.3 : 546.742

Г.М.КОЧЕТОВ, канд. хим. наук, В.Е.ТЕРНОВЦЕВ, д-р техн. наук
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ПРОМЫВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕХОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ

Предлагается технология очистки промывных сточных вод участка никелирования гальванических производств с использованием компактных сооружений.

За последнее десятилетие в Украине увеличился объем сточных вод, сбрасываемых в водоемы без какой-либо очистки. Промышленные стоки содержат значительное количество различных токсичных загрязнителей, в том числе соединений тяжелых металлов – железа, никеля, меди, хрома, цинка и др., которые попадают в сточные воды главным образом в результате гальванических и травильных операций. Очистные сооружения не обеспечивают необходимой степени очистки воды, не предусматривают переработку отходов очистки с целью извлечения и переработки ценных компонентов. Наиболее перспективным решением проблемы защиты окружающей среды от загрязнения ее сточными водами промышленных предприятий является создание компактных сооружений для систем локальной очистки после отдельных технологических процессов, например, участка нанесения никелевых покрытий.

Никелирование – популярный и широко применяемый гальванический процесс, а никель – особо токсичный и в то же время ценный и дефицитный металл. В этой связи актуально создание экономичной комплексной технологии очистки сточных вод линии никелирования с использованием замкнутого водооборота. При разработке такой технологии нами преследовались следующие основные цели: