

где A – коэффициент пропорциональности; $d_{\text{ч}}$ и $\rho_{\text{ч}}$ – размер и плотность частиц пыли; $\nu_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{г}}$ – кинематическая вязкость и плотность газа (теплоносителя); ΔP – сопротивление на трение при прохождении потока или струи газа через каналы между насадками барабанного аппарата или зигзагообразного пылеуловителя; $u_{\text{к}}$ – средняя скорость газоздушных струй в каналах; l – длина канала; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала, определяемый по известному соотношению для четырехугольного канала с размерами $b \times B$ (b – ширина канала, B – ширина разгрузочного бункера).

Данное выражение позволяют в явном виде быстро оценить влияние режимных, конструктивных характеристик и физических свойств газового потока с аэрозольными частицами на эффективность сепарации в барабане с различными насадками.

Разработанная математическая модель сепарации аэрозолей позволяет оценить эффективность использования различных конструктивных элементов при экологической модернизации или проектировании сушильно-барабанных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Алтухов, А.В. Балабеков О.С. Барабанный сушильный агрегат. Основы теории и расчета / А.В. Алтухов, О.С. Балабеков – Алматы: Гылым, 1998. – 208 с.
- 2 Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е.П. Медников. – М.: Наука, 1980. – 176 с.

УДК 66.065

А.М. Волк, канд. техн. наук, доц.;

А.И. Вилькоцкий, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, г.Минск)

МЕТОДЫ РАССЧЕТА ПЛЕНОЧНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Введение. Анализ способов взаимодействия газожидкостных потоков в процессах разделения фаз показывает, что перспективным является способ с использованием закрученных потоков, который позволяет значительно повысить эффективность при разделении фаз и в теплообменных процессах.

Гидродинамика пленочного течения на проницаемых поверхностях имеет существенное значение для процессов фильтрования суспензий, отвода жидкой фазы в процессе сепарации газожидкостных потоков, при массообмене [1]. Отсос используется так же для управления пограничным слоем и влияния на устойчивость ламинарного режима движения [2, 3].

Следует отметить, что расчет параметров, влияющих на эффективность устройств с пленочным движением жидкости в режимах прямотока или противотока в сочетании с закрученным потоком газа до настоящего времени базируется в основном на экспериментальных данных.

Математическое моделирование исследуемых процессов позволяет определить оптимальные режимы, соотношение между геометрическими параметрами цилиндрических элементов конструкции и нагрузками по фазам.

Основная часть. Рассмотрим установившееся осесимметричное течение вязкой несжимаемой жидкости по внутренней стенке проникаемого цилиндра под воздействием закрученного газового потока (рисунок). Ось z цилиндрической системы координат направим вниз по оси цилиндров.

В силу осесимметричности $\frac{\partial U}{\partial \varphi} \equiv 0$. Запишем уравнения Навье -

Стокса для составляющих скорости и неразрывности [4]:

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} + \frac{U_\varphi U_r}{r} \right) = \rho g_\varphi + \mu \left(\frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi}{r^2} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_\varphi^2}{r} \right) = \rho g_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_r}{r^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Скорость оттока жидкой фазы U_0 на некотором элементарном цилиндре длиной Δz будем считать постоянной. Объемный расход несжимаемой жидкости через цилиндрические поверхности равной длины будет одинаков: $2\pi r U_r \Delta z = 2\pi R U_0 \Delta z$. Отсюда находим радиальную скорость в пленке жидкости $U_r = \frac{U_0 R}{r}$. Тогда из уравнения

неразрывности получим $\frac{\partial U_z}{\partial z} = 0$ и $U_z = U_z(r)$. Принимаем

$$\psi = \frac{\partial P}{\partial z} = \text{const.}$$

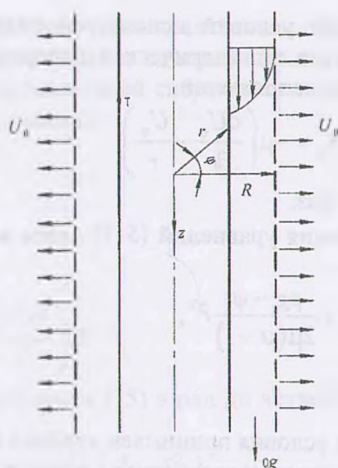


Схема двухфазного пленочного течения на проницаемой поверхности

Уравнения (1-4) преобразовываются к виду:

$$\frac{d^2 U_z}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{U_0 R}{\nu} - 1 \right) \frac{dU_z}{dr} = - \frac{\rho g - \psi}{\mu},$$

$$\frac{d^2 U_\varphi}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{U_0 R}{\nu} - 1 \right) \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{1}{r^2} \left(\frac{U_0 R}{\nu} + 1 \right) U_\varphi = 0;$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \left(\frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{U_0^2 R^2}{r^3} \right).$$

В результате получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Это означает, что решение $U = U(r)$ будет автомодельным. Выполним переход к безразмерной координате $\bar{r} = r/R$,

обозначим $\alpha = \frac{U_0 R}{\nu}$ и получим

$$\frac{d^2 U_z}{d\bar{r}^2} - \frac{(\alpha - 1)}{\bar{r}} \frac{dU_z}{d\bar{r}} = - \frac{\rho g - \psi}{\mu} R^2; \quad (5)$$

$$\frac{d^2 U_\varphi}{d\bar{r}^2} - \frac{(\alpha - 1)}{\bar{r}} \frac{dU_\varphi}{d\bar{r}} - \frac{(\alpha + 1)}{\bar{r}^2} U_\varphi = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \left(\frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{U_0^2 R^2}{r^3} \right). \quad (7)$$

Для граничных условий используем значения составляющих скорости жидкости на цилиндрической поверхности и компонентов тензора касательных напряжений

$$\tau_z = -\mu \frac{\partial U_z}{\partial r}; \quad \tau_\varphi = -\mu \left(\frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi}{r} \right) \quad (8)$$

на границе раздела фаз.

Частные решения уравнений (5-7) ищем в виде r^k и получаем общие решения:

$$U_z = c_1 + c_2 \bar{r}^\alpha + \frac{\rho g - \Psi}{2\mu(\alpha-1)} \bar{r}^2, \quad (9)$$

$$U_\varphi = \frac{c_3}{\bar{r}} + c_4 \bar{r}^{\alpha+1}. \quad (10)$$

За граничные условия принимаем условие прилипания на стенке и равенство касательных напряжений на границе раздела фаз:

$$U_z|_{\bar{r}=1} = U_\varphi|_{\bar{r}=1} = 0; \quad \tau_z = -\frac{\mu}{R} \frac{dU_z}{d\bar{r}} \Big|_{\bar{r}=1-\delta}; \quad (11)$$

$$\tau_\varphi = -\mu \left(\frac{\partial U_\varphi}{R \partial \bar{r}} - \frac{U_\varphi}{R \bar{r}} \right) \Big|_{\bar{r}=1-\delta}. \quad (12)$$

Из условия равновесия сил, действующих на газовый поток:

$$\pi(R-\delta)^2 \Delta P = 2\pi(R-\delta) \tau'_z l,$$

получим

$$\Psi = \frac{\Delta P}{l} = \frac{2\tau'_z}{R(1-\delta)} = -\frac{2\tau_z}{R(1-\delta)}.$$

Учитывая граничные условия (11-12), получаем распределение скорости в пленке жидкости:

$$U_z = \left[\frac{\tau_z R}{\mu(\alpha-2)(1-\delta)^{\alpha-1}} + \frac{\rho g R^2}{\mu\alpha(\alpha-2)(1-\delta)^{\alpha-2}} \right] \times \\ \times (1-\bar{r}^\alpha) - \left[\frac{\rho g R^2}{2\mu\alpha(\alpha-2)} + \frac{\tau_z R}{\mu(\alpha-2)(1-\delta)} \right] (1-\bar{r}^2); \quad (13)$$

$$U_\varphi = \frac{R\tau_\varphi (1-\delta)^2}{\mu\alpha(1-\delta)^{\alpha+2} + 2\mu} \left(\frac{1}{\bar{r}} - \bar{r}^{\alpha+1} \right). \quad (14)$$

Интегрированием полученных зависимостей (13–14) находим объемный расход жидкой фазы на единицу периметра, среднее значение тангенциальной составляющей скорости пленки и перепад давления в радиальном направлении:

$$q = R \int_{1-\delta}^1 U_z \bar{r} d\bar{r}; \quad (15)$$

$$\bar{U}_\varphi = \frac{1}{\delta} \int_{1-\delta}^1 U_\varphi d\bar{r}; \quad (16)$$

$$\Delta P_r = \rho \int_{1-\delta}^1 \left(\frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{U_0^2 R^2}{r^3} \right) d\bar{r}. \quad (17)$$

Разложение зависимости (15) в ряд до четвертой степени включительно имеет вид

$$q = \frac{\tau_s \delta^2}{\mu} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \frac{U_0 \delta}{\nu} + \frac{1}{8} \left(\frac{U_0^2 \delta^2}{\nu^2} + \frac{\delta^2}{R^2} \right) + \dots \right] + \frac{\rho g \delta^3}{\mu} \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{24} \left(3 \frac{U_0 \delta}{\nu} - 8 \frac{\delta}{R} \right) + \dots \right], \quad (18)$$

Данное разложение показывает, что изменение гидродинамических характеристик вследствие оттока жидкой фазы происходит, когда безразмерный комплекс Рейнольдса $\frac{U_0 \delta}{\nu}$ соизмерим с единицей.

Изменение данного объемного расхода по длине описывается уравнением

$$\frac{dq}{dz} = -U_0. \quad (19)$$

Данное разложение показывает, что изменение гидродинамических характеристик вследствие оттока жидкой фазы происходит, когда безразмерный комплекс Рейнольдса $\frac{U_0 \delta}{\nu}$ соизмерим с единицей.

Закключение. Разработана математическая модель для определения гидродинамических характеристик пленочного течения под воздействием закрученного газового потока с учетом оттока жидкой фазы. Данная модель позволяет учитывать гидродинамику пленки при исследовании процессов фильтрования, сепарации и тепломассообмена.

Впервые выполнены теоретические исследования, позволяющие обосновать способ газопленочного проточного фильтрования, разработать методику расчета разделения многофазных потоков в полях

массовых сил, эффективной сепарации газожидкостных потоков с удалением жидкой фазы и процессов массообмена.

Обозначения. c_1, c_2, c_3, c_4 , – постоянные коэффициенты; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; l – длина пронизываемого цилиндрического элемента, м ; P , – давление, Па ; ΔP – перепад давления, Па/м ; q – удельный объемный расход жидкой фазы, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$; r – расстояние в радиальном направлении в цилиндрической системе координат, м ; R – радиус пронизываемого цилиндрического элемента, м ; $\bar{r} = r/R$ – безразмерная радиальная координата; Re – число Рейнольдса пленки жидкости; U_z, U_φ, U_r – осевая, тангенциальная и радиальная составляющие скорости жидкости соответственно, м/с ; U_0 – скорость оттока жидкости через пронизываемую поверхность, м/с ; α – коэффициент; z – осевая координата цилиндрической системы координат, м ; δ – толщина пленки жидкости, м ; $\bar{\delta} = \delta/R$ – безразмерная толщина пленки жидкости; $\pi = 3,14159\dots$; ψ – перепад давления, Па/м ; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, кг/м^3 ; τ – касательные напряжения, Н/м^2 ; φ – угол в цилиндрической системе координат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. / Н. И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – Кн. 1. – 384 с.
2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский // 6-с изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

УДК 621.928.37+621.928.93

Д.И. Мисюля, ст. преп., к-т техн. наук, dzmitry.misiulia@mail.ru;

П.Е. Вайтехович, проф., д-р техн. наук;

В.В. Кузьмин, доц., к-т техн. наук; К.А. Карпов, магистрант
(БГТУ, г. Минск)

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ, ВЫХОДЯЩИХ ИЗ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Важнейшим резервом экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, а также улучшения экологического состояния окружающей среды является утилизация теплоты отходящих газообразных потоков различного топливо- и энергоиспользующего оборудования.