ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ В МОНОДИСПЕРСНОМ РЕЖИМЕ РАСПЫЛИВАНИЯ ПОРИСТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ

Р. Г. Сафиуллин
Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань (Россия)

Пористые вращающиеся распылители (ПВР), создающие объемный и практически монодисперсный факел распыла, могут существенно повысить эффективность распылительных аппаратов водоподготовки и водооборотного цикла в теплоэнергетике, тепловлагообменных устройств в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако сегодня нет достаточных сведений о закономерностях каплеобразования на зернах ПВР. Разработчикам распылительной техники необходимы данные, которые позволяли бы определять размеры образующихся капель в зависимости от геометрии гранул, пор и режимных параметров работы ПВР.

Скорость истечения жидкости из пор определяет динамику формирования капель на зернах внешней поверхности ПВР. Получим ее значение, применяя методы линейной теории фильтрации. Имеем следующие уравнения для одномерного фильтрационного потока идеальной жидкости через пористую стенку ПВР (рис. 1):

уравнение движения –

$$\rho\frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho\vec{z}\omega^2 + \vec{f}_{тр}, \quad (1)$$

уравнение неразрывности –

$$div\ \vec{v} = 0, \quad (2)$$

где $\vec{v}$– вектор скорости; p – давление жидкости; ω – угловая скорость вращения распылителя; $\vec{f}_{тр}$ – вектор объемных сил сопротивления пористой среды фильтрации жидкости; $\vec{z}$ – радиус-вектор точки пористой среды с началом на оси вращения ПВР.

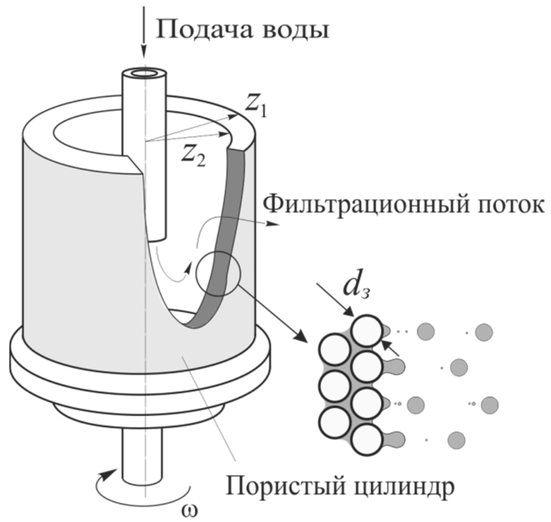

Рис. 1. Расчетная схема ПВР для определения скорости фильтрации

При медленном течении жидкости в порах ПВР в уравнении (1) можно пренебречь ускорением. Для сил сопротивления примем линейную зависимость от скорости фильтрации [1]

$$\vec{f}_{тр} = -\frac{\mu}{\chi}\vec{v}_ф, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости; χ – проницаемость стенок ПВР, связанная с размерами зерна d_3 и пористостью por формулой Козени [2]

$$\chi = \beta\frac{por^3}{(1-por)^2}d_з^2,$$

здесь β=1÷10 – опытный коэффициент.

Тогда уравнение движения (1) фильтрационного потока в порах ПВР примет вид:

$$-\frac{\mu}{\chi}\vec{v}_ф = \nabla p - \rho\vec{z}\omega^2,$$

или

$$\frac{\chi}{\mu}\nabla\left(p-\frac{\rho\omega^2}{2}\vec{z}^{\,2}\right)+\vec{v}_\phi=0. \tag{4}$$

Запишем уравнение (4) в виде

$$div\left[\frac{\chi}{\mu}\nabla\left(p-\frac{\rho\omega^2}{2}z^2\right)\right]+div\ \vec{v}_\phi=0. \tag{5}$$

Так как $div\ v_\phi=0$, то

$$div\left[\frac{\chi}{\mu}\nabla\left(p-\frac{\rho\omega^2}{2}z^2\right)\right]=0. \tag{6}$$

Для определения v_ϕ из уравнения (5) введем потенциальную функцию вида $\varphi=p-\frac{\rho\omega^2}{2}z^2$. Частное решение такой функции может иметь вид $\varphi=c_1\,ln\,z+c_2$. Тогда получаем

$$p-\frac{\rho\omega^2}{2}z^2=c_1\,ln\,z+c_2, \tag{7}$$

где постоянная интегрирования c_1 может быть определена из известных условий на внешней и внутренней поверхностях пористого цилиндра ПВР. Так, для принятого нами случая, когда фильтрация происходит только под действием центробежной силы, эти условия таковы (рис. 1):

$$p=0 \text{ при } z=z_1 \text{ и } z=z_2.$$

Тогда

$$c_1=-\frac{\rho\omega^2}{2}\frac{z_1^2-z_2^2}{\ln(z_1/z_2)};$$

$$\text{и}\quad p-\frac{\rho\omega^2}{2}z^2=-\frac{\rho\omega^2}{2}\cdot\frac{z_1^2-z_2^2}{\ln(z_1/z_2)}. \tag{8}$$

Используя уравнения (8) и (4), находим выражение для скорости фильтрации на внешней поверхности ПВР, где $z=z_1$:

$$v_\phi=\frac{\chi}{\mu}\cdot\frac{\rho\omega^2}{2}\cdot\frac{z_1^2-z_2^2}{\ln(z_1/z_2)}\cdot\frac{1}{z_1}. \tag{9}$$

Необходимо отметить, что линейная теория удовлетворительно описывает процесс фильтрации при значениях числа $Re=v_\phi d_з\rho/\mu\leq 3\div10$ [1]. Эти же значения Re характерны для течения воды через поры ПВР при монодисперсном распыливании [3].

Считая предельной величину $Re^{пред}$ = 10, получаем следующее соотношение параметров, которое накладывает ограничение на скорость фильтрации v_ϕ для достижения «капельного» монодисперсного режима распыливания с помощью ПВР:

$$v_{\phi}^{пред}=\frac{Re^{пред}\,\mu}{d_з\rho}=\frac{10\mu}{d_з\rho}=\beta\frac{por^3}{(1-por)^2}d_з^2\frac{z_1^2-z_2^2}{ln\frac{z_1}{z_2}}\cdot\frac{1}{z_1}\cdot\frac{\rho\omega^2}{2}. \qquad (10)$$

Последнее выражение можно представить в виде

$$\beta\cdot P_1\cdot P_2\cdot P_3\cdot\omega^2\le 1, \qquad (11)$$

где параметр $P_1=\frac{por^3}{(1-por)^2}d_з^3$ характеризует пористую структуру ПВР; параметр $P_2=\frac{z_1^2-r_2^2}{\ln(z_1/z_2)}\frac{1}{z_1}$ отражает геометрию распылителя; параметр $P_3=\frac{\rho^2}{20\mu^2}$ характеризует свойства распыляемой жидкости.

Полученная формула (11) дает возможность определять геометрию ПВР и диапазон угловых скоростей ω (технологический параметр работы ПВР), при которых скорости фильтрации и натекания на поверхностные зерна ПВР соответствуют «капельному» режиму каплеобразования. Так, геометрический параметр P_2 должен быть меньше предельной величины $P_2^{пред}$, определяемой из условия ламинарности течения жидкости в порах материала распылителя ($Re_{пор}\le 10$).

$$P_2^{пред}=\frac{20(1-por)^2\cdot\mu^2}{\beta\cdot d_з^3\cdot por^3\cdot\rho^2\cdot\omega^2}. \qquad (12)$$

Отметим, что формула (11) содержит параметр β (он входит в выражение для проницаемости среды). Этот коэффициент не зависит от пористости и размера зерен (т.е. от структуры пористого тела), но зависит от текстуры материала и параметров жидкости. В некотором смысле параметр β идентифицирует пористое тело и его взаимодействие с жидкостью (адгезию).

На рис. 2 представлены графики зависимости скорости фильтрации v_{ϕ} от параметров n ($n = 2\pi\omega$) и β, полученные по выражению (9) для ПВР-250 (диаметр зерна $d_з$ = 250 мкм, пористость por = 0,42) с внутренним радиусом z_2=50 мм и толщиной стенки l=5 мм. Здесь же приведена зависимость для этого распылителя (пунктирная линия), полученная по опытным данным в работе [4]. Она связывает перепад давлений Δp на внутренней и внешней поверхностях оболочки ПВР со скоростью истечения из пор v_{ϕ}:

$$\frac{\Delta p}{l}=\alpha\mu v_{\phi}+\beta\rho v_{\phi}^2, \qquad (13)$$

где $\Delta p=\rho\frac{\omega^2}{2}\left[(z_2+l)^2-z_2^2\right]$; α = 68,91×10^8 и β = 16380 – опытные коэффициенты.

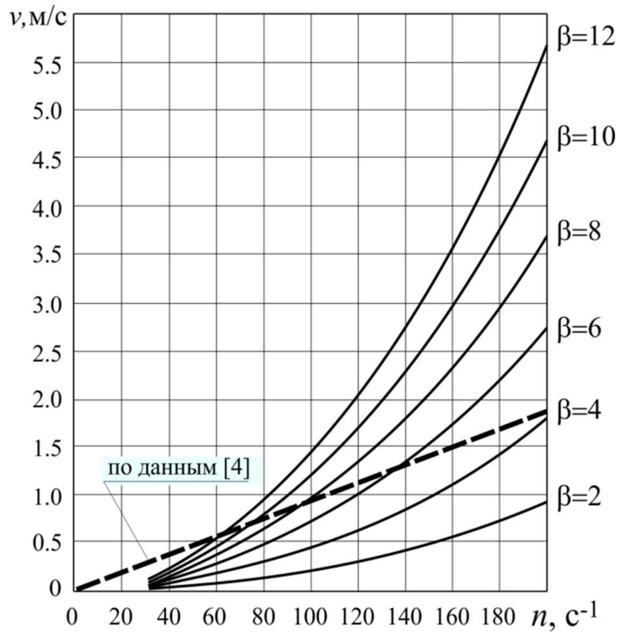

Рис. 2. Графики зависимостей (9) и (14) в диапазоне $0 < n < 200$ с$^{-1}$

Уравнение (13) в форме (14), так же как и (9), позволяет определить скорость фильтрации $v_ф$ при различных значениях угловой скорости вращения ω:

$$v_ф = -\frac{\alpha\mu}{2\beta\rho} + \sqrt{\left(\frac{\alpha\mu}{2\beta\rho}\right)^2 + \frac{\omega^2\left(z_2 + l/2\right)}{\beta}}. \quad (14)$$

По данным [5] формула (13) справедлива в диапазоне частот вращения = 5÷200 с$^{-1}$, который включает в себя как интервал частот n, соответствующих $Re_{пор} \leq 10$, так и интервал n, соответствующих $Re_{пор} \geq 10$.

Как видно из рис. 2, значения $v_{ср}$ по зависимостям (9) и (14) близки при β < 6. Поэтому формулу (9) можно рекомендовать для расчета скорости фильтрации при работе ПВР из материала, имеющего величину β < 6. При больших значениях β скорость истечения из пор должна определяться с учетом нелинейного характера зависимости $\vec{f}_{тр}$ от $\vec{v}_ф$.

Литература

1. Голубева, О. В. Курс механики сплошных сред / О. В. Голубева. – М. : Высшая школа, 1972. – 368 с.

2. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М. : Наука, 1977. – 664 с.

3. Колесник, А. А. Пористые вращающиеся распылители жидкости / А. А. Колесник, Н. А. Николаев // ТОХТ. – 1986. – Т. 40, № 6. – С. 485–495.

4. Червяков, В. Д. Гидродинамика пористой вращающейся оболочки / В. Д. Червяков // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 1987. – Т. 30, № 9. – С. 122–124.