

СКОРОСТЬ ПАДЕНИЯ КАПЛИ В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ АБСОРБЕРЕ

Balchugov A.V.

DROP FALLING SPEED IN A SPRAY ABSORBER

Аннотация. С использованием метода анализа размерностей получен общий вид критериального уравнения для скорости свободного падения капли жидкости в распылительном абсорбере.

Ключевые слова: теория подобия, метод анализа размерностей, распылительный абсорбер, скорость падения капли, критериальное уравнение.

Abstract. Using dimensional analysis, a general criterion equation for the free-fall velocity of a liquid droplet in a spray absorber is obtained.

Keywords: similarity theory, dimensional analysis, spray absorber, droplet fall velocity, criterion equation.

Рассмотрим процесс свободного падения капли жидкости в распылительном абсорбере [1-3]. С использованием метода анализа размерностей [3] получим общий вид критериального уравнения для этого процесса.

Установим параметры процесса, влияющие на скорость падения капли (w , м/с): ρ_g – плотность газа, кг/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости газа, кг/(м·с); d – диаметр капли, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, кг/с²; ε – объемная доля капель в газожидкостной смеси. Известно, что скорость стесненного падения капель всегда меньше скорости падения одиночной капли [1], поэтому в число определяющих параметров включаем объемную долю капель в газожидкостной смеси ε .

Зависимость скорости падения капли от параметров процесса имеет вид:

$$w = f(\rho_g, \rho, \mu, d, g, \sigma, \varepsilon). \quad (1)$$

Первичными единицами измерения в механических и гидродинамических процессах являются: килограммы (единица измерения массы [M]), метры (единица измерения длины [L]), секунды (единица измерения времени [T]).

Представим единицу измерения скорости падения капли через первичные (основные) единицы измерения:

$$[w] = [L][M]^0 [T]^{-1}. \quad (2)$$

Аналогично запишем для остальных параметров процесса:

$$[\rho_g] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (3)$$

$$[\rho] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (4)$$

$$[\mu] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}, \quad (5)$$

$$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0, \quad (6)$$

$$[g] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-2}, \quad (7)$$

$$[\sigma] = [L]^0 [M]^1 [T]^{-2}. \quad (8)$$

Примем за основные величины w, σ, d . Число переменных величин (параметров процесса) равно $n=8$. Количество первичных (основных) единиц измерения равно $m=3$. В соответствии с теоремой подобия [3] число критериев подобия, описывающих падение капли, равно $n-m=5$.

Критерии подобия получаются делением каждой оставшейся величины (ρ_z, ρ, μ, g) на произведение основных величин (w, σ, d), возведенных в степени.

Критерии подобия будут иметь вид:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_z}{w^a \cdot \sigma^b \cdot d^c}, \quad (9)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho}{w^k \cdot \sigma^l \cdot d^m}, \quad (10)$$

$$\Pi_3 = \frac{\mu}{w^e \cdot \sigma^p \cdot d^r}, \quad (11)$$

$$\Pi_4 = \frac{g}{w^x \cdot \sigma^y \cdot d^z}. \quad (12)$$

Объемная доля капель в газожидкостной смеси ε является безразмерной величиной, поэтому ее можно рассматривать как критерий подобия:

$$\Pi_5 = \varepsilon.$$

Критерий (9) – безразмерная величина, следовательно, справедливо выражение:

$$\frac{[\rho_z]}{[w]^a \cdot [\sigma]^b \cdot [d]^c} = 1, \quad (13)$$

или

$$\frac{[L]^{-3} [M]}{([L][T]^{-1})^a \cdot ([M][T]^{-2})^b \cdot [L]^c} = 1. \quad (14)$$

Тогда:

$$[M]^{1-b} [L]^{-3-a-c} [T]^{a+2b} = 1. \quad (15)$$

Равенство (15) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} 1-b &= 0 \\ -3-a-c &= 0 \\ a+2b &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

откуда: $b=1, c=-1, a=-2$.

Критерий подобия (9) примет вид:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_z}{w^{-2} \cdot \sigma \cdot d^{-1}} = \frac{w^2 \cdot \rho_z \cdot d}{\sigma}.$$

Безразмерным является также критерий (10). Тогда

$$\frac{[\rho]}{[w]^k \cdot [\sigma]^l \cdot [d]^m} = 1, \quad (17)$$

$$\frac{[L]^{-3} [M]}{([L][T]^{-1})^k \cdot ([M][T]^{-2})^l \cdot [L]^m} = 1, \quad (18)$$

$$[M]^{1-l} [L]^{-3-k-m} [T]^{k+2l} = 1. \quad (19)$$

Равенство (19) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} 1-l &= 0 \\ -3-k-m &= 0 \\ k+2l &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

откуда: $l=1, m=-1, k=-2$.

Критерий подобия (10) примет вид:

$$\Pi_2 = \frac{\rho}{w^{-2} \cdot \sigma \cdot d^{-1}} = \frac{w^2 \cdot \rho \cdot d}{\sigma} = We.$$

Критерий $\Pi_2=We$ называется критерием Вебера.

Критерий Π_3 безразмерный, тогда:

$$\frac{[\mu]}{[w]^e \cdot [\sigma]^p \cdot [d]^r} = 1, \quad (21)$$

$$\frac{[L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}}{([L][T]^{-1})^e \cdot ([M][T]^{-2})^p \cdot [L]^r} = 1. \quad (22)$$

$$[M]^{1-p} [L]^{-1-e-r} [T]^{-1+e+2p} = 1. \quad (23)$$

Равенство (23) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} 1-p &= 0 \\ -1-e-r &= 0 \\ -1+e+2p &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

откуда: $r=0, p=1, e=-1$.

Безразмерный критерий подобия (11) принимает вид:

$$\Pi_3 = \frac{w \cdot \mu}{\sigma}.$$

Критерий Π_4 также безразмерный, тогда:

$$\frac{[g]}{[w]^x \cdot [\sigma]^y \cdot [d]^z} = 1, \quad (25)$$

$$\frac{[L]^1 [T]^{-2}}{([L][T]^{-1})^x \cdot ([M][T]^{-2})^y \cdot [L]^z} = 1. \quad (26)$$

$$[M]^{-y} [L]^{1-x-z} [T]^{-2+x+2y} = 1. \quad (27)$$

Равенство (27) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} -y &= 0 \\ 1-x-z &= 0 \\ -2+x+2y &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

откуда: $y = 0$, $x = 2$, $z = -1$.

Безразмерный критерий подобия (12) принимает вид:

$$\Pi_4 = \frac{g \cdot d}{w^2}.$$

Критерий Π_4 можно записать в виде:

$$\Pi_4 = Fr = \frac{w^2}{g \cdot d}.$$

Критерий $\Pi_4 = Fr$ называется критерием Фруда.

Преобразуем критерии Π_1 и Π_3 :

$$\Pi_1 \cdot \frac{\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\Pi_3} = \frac{w^2 \cdot \rho_z \cdot d}{\sigma} \cdot \frac{\rho}{\rho} \cdot \frac{\sigma}{w \cdot \mu} = \frac{\rho_z}{\rho} \cdot \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \rho' \cdot Re,$$

где Re – критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \text{ и } \rho' = \frac{\rho_z}{\rho}.$$

Зависимость между безразмерными критериями подобия для падающей капли:

$$\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \varphi \left(\frac{\rho_z}{\rho}; \frac{w^2}{g \cdot d}; \frac{w^2 \cdot \rho \cdot d}{\sigma}; \varepsilon \right), \quad (29)$$

или

$$Re = C \cdot (\rho')^\alpha \cdot Fr^\beta \cdot We^\gamma \cdot \varepsilon^\chi. \quad (30)$$

Значения коэффициента C и показателей степени α , β , γ , χ в уравнении (30) можно определить экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рамм В.М.** Абсорбция газов. М.: Химия. 1976. – 656 с.
2. **Бальчугов А.В., Бадеников А.В.** Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Учебное пособие. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. – 188 с.
3. **Архипов В.А., Коноваленко А.И.** Практикум по теории подобия и анализу размерностей. Учебное пособие. Томск: ТГУ, 2016. – 93 с.