

Бальчугов Алексей Валерьевич,
д.т.н., профессор кафедры МАХП, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: balchug@mail.ru

Бадеников Артем Викторович,
к.т.н., ректор, Ангарский государственный технический университет, e-mail: rector@angtu.ru

Мусева Татьяна Николаевна,
к.т.н., доцент кафедры физико-математических наук, Ангарский государственный технический университет

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БРЫЗГОУНОСА В НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ

Balchugov A.V., Badenikov A.V., Museva T.N.

CRITERIAL DEPENDENCE FOR DETERMINING SPLASH DRAIN IN A PACKED COLUMN

Аннотация. Получено критериальное уравнение для определения брызгоуноса в насадочной массообменной колонне методом анализа размерностей.

Ключевые слова: критериальное уравнение, насадочная колонна, брызгоунос, метод анализа размерностей.

Abstract. A criterion equation is obtained for determining the spray entrainment in a packed mass transfer column by the method of dimensional analysis.

Keywords: criterion equation, packed column, spray entrainment, dimensional analysis method.

Явление брызгоуноса оказывает существенное влияние на эффективность работы насадочной массообменной колонны [1]. От величины брызгоуноса зависит средняя движущая сила массопередачи в колонне и, как следствие, интенсивность массопередачи. Методом анализа размерностей получим общий вид критериальной зависимости для определения брызгоуноса u (кг жидкости/кг газа) в насадочной массообменной колонне. Брызгоунос зависит от приведенной скорости газа w_2 (м/с), приведенной скорости жидкости $w_{жс}$ (м/с), коэффициента поверхностного натяжения σ (Н/м), плотности жидкости $\rho_{ж}$ (кг/м³), плотности газа ρ_2 (кг/м³), динамического коэффициента вязкости жидкости $\mu_{ж}$ (Па·с), динамического коэффициента вязкости газа μ_2 (Па·с), эквивалентного диаметра насадки d (м).

Зависимость брызгоуноса от указанных параметров имеет вид:

$$u = f(w_2, w_{жс}, \sigma, \rho_2, \rho_{жс}, \mu_{жс}, \mu_2, d). \quad (1)$$

Методом анализа размерностей преобразуем функцию (1) в критериальную зависимость. В функции (1) число переменных $p=9$, число их единиц измерения (длины, времени и массы) $k=3$. Тогда, в соответствии с теоремой теории подобия [2], число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно $(p-k)=6$.

Представим функцию (1) в виде эмпирической степенной зависимости:

$$u = C \cdot w_2^x w_{жс}^y \sigma^z \rho_2^n \rho_{жс}^m \mu_{жс}^f \mu_2^c d^a, \quad (2)$$

где C – безразмерный коэффициент; x, y, z, n, m, f, c, a – безразмерные показатели степени.

Запишем размерности величин, входящих в уравнение (2):

$$\begin{aligned} [u] &= \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{\kappa \mathcal{Z}} \right] = []; [w_z] = \left[\frac{M}{c} \right]; [w_{жс}] = \left[\frac{M}{c} \right]; [\sigma] = \left[\frac{H}{M} \right] = \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{c^2} \right]; \\ [\rho_z] &= \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^3} \right]; [\rho_{жс}] = \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^3} \right]; [\mu_{жс}] = [Pa \cdot c] = \left[\frac{H \cdot c}{M^2} \right] = \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M \cdot c} \right]; \\ [\mu_z] &= \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M \cdot c} \right]; [d] = [M]. \end{aligned}$$

Составим равенство размерностей левой и правой частей уравнения (2):

$$[] = \left[\frac{M}{c} \right]^x \cdot \left[\frac{M}{c} \right]^y \cdot \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{c^2} \right]^z \cdot \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^3} \right]^n \cdot \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^3} \right]^m \cdot \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M \cdot c} \right]^f \cdot \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M \cdot c} \right]^c \cdot [M]^a. \quad (3)$$

Приравняем показатели степеней при одинаковых составляющих единиц измерения в обеих частях уравнения:

$$\begin{aligned} 0 &= x + y - 3n - 3m - f - c + a, \\ 0 &= -x - y - 2z - f - c, \\ 0 &= z + n + m + f + c. \end{aligned} \quad (4)$$

В системе уравнений (4) – восемь неизвестных. Выразим переменные c, a, x через z, n, m, f, y :

$$\begin{aligned} c &= -z - n - m - f, \\ x &= n + m - y - z, \\ a &= n + m. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим показатели степеней c, x, a в степенную функцию (2):

$$u = C \cdot w_z^{n+m-y-z} w_{жс}^y \sigma^z \rho_z^n \rho_{жс}^m \mu_{жс}^f \mu_z^{-z-n-m-f} \cdot d^{n+m}, \quad (6)$$

или

$$u = C \cdot w_z^n w_z^m w_z^{-y} w_z^{-z} w_{жс}^y \sigma^z \rho_z^n \rho_{жс}^m \mu_{жс}^f \mu_z^{-z} \mu_z^{-n} \mu_z^{-m} \mu_z^{-f} d^n d^m. \quad (7)$$

Сгруппировав величины, получим искомую зависимость:

$$u = C \cdot \left(\frac{w_z \cdot \rho_z \cdot d}{\mu_z} \right)^a \cdot \left(\frac{\sigma}{w_z \cdot \mu_z} \right)^z \cdot \left(\frac{w_{жс}}{w_z} \right)^y \cdot \left(\frac{\rho_{жс}}{\rho_z} \right)^m \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_z} \right)^f, \quad (8)$$

или

$$u = C \cdot Re_z^a \cdot K^z \cdot \left(\frac{w_{жс}}{w_z} \right)^y \cdot \left(\frac{\rho_{жс}}{\rho_z} \right)^m \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_z} \right)^f, \quad (9)$$

где Re_z – критерий Рейнольдса газа; $K = \sigma / (w_z \mu_z)$ – дополнительный безразмерный критерий. Таким образом, получен общий вид критериальной зависимости для определения брызгоуноса в насадочной массообменной колонне. Как отмечалось ранее, уравнение (9) содержит шесть безразмерных комплексов: $u, Re, K, w_{жс}/w_z, \rho_{жс}/\rho_z, \mu_{жс}/\mu_z$. Численные значения коэффициента C и показателей степеней a, z, y, m, f могут быть определены экспериментальным путем.

Определим показатели степени и коэффициент C в уравнении (9) для результатов экспериментов, полученных при гидродинамических исследованиях

регулярной ударно-распылительной насадки в работе [3]. Эквивалентный диаметр насадки $d=0,055$ м. Результаты экспериментов приведены на рисунке и в таблице.

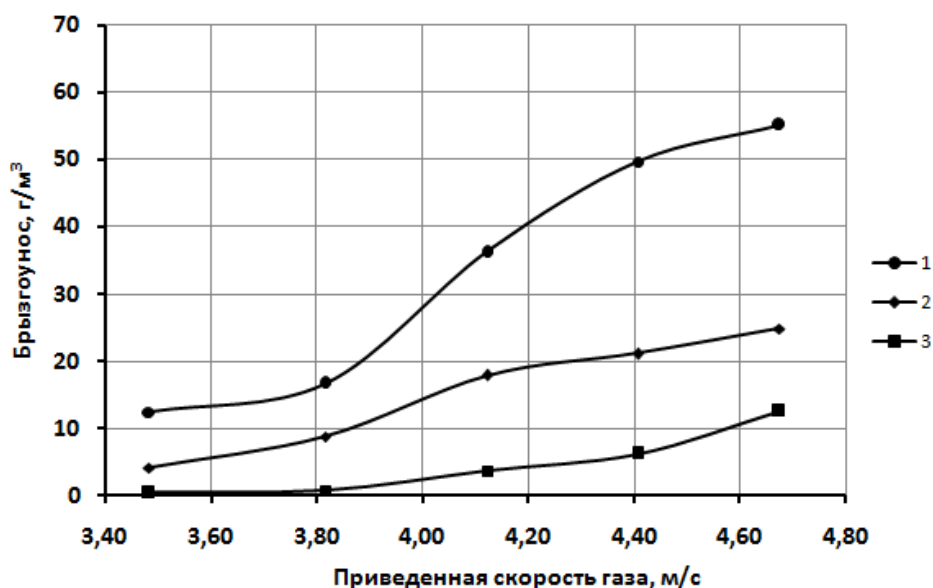


Рис. Зависимость брызгоуноса от приведенной скорости газа в слое регулярной ударно-распылительной насадки [3].

Таблица

Результаты гидродинамических экспериментов [3]

№	Re_z	K	$w_{ж}/w_z$	u , кг/кг
1	12428,17	1179,766	0,007328	0,010763
2	13642,42	1074,761	0,006675	0,014426
3	14713,81	996,5016	0,006189	0,031198
4	15749,49	930,972	0,005782	0,042764
5	16678,03	879,1406	0,00546	0,047495
6	12428,17	1179,766	0,004797	0,00363
7	13642,42	1074,761	0,00437	0,007563
8	14713,81	996,5016	0,004052	0,01541
9	15749,49	930,972	0,003785	0,018232
10	16678,03	879,1406	0,003575	0,021407
11	12428,17	1179,766	0,002321	0,00043
12	13642,42	1074,761	0,002115	0,000688
13	14713,81	996,5016	0,001961	0,003172
14	15749,49	930,972	0,001832	0,00535
15	16678,03	879,1406	0,00173	0,010823

В таблице не приведены значения безразмерных комплексов $\rho_{ж}/\rho_z$; $\mu_{ж}/\mu_z$, поскольку их значения в экспериментах не изменялись.

Подставив выборочно данные таблицы из строк 1, 5, 7, 10, 13, 14 в уравнение (9), получим следующие условные уравнения:

$$0,010763 = C \cdot 12428,17^a \cdot 1179,766^z \cdot 0,007328^y, \quad (10, \text{ строка } 1)$$

$$0,047495 = C \cdot 16678,03^a \cdot 879,1406^z \cdot 0,00546^y, \quad (11, \text{ строка } 5)$$

$$0,007563 = C \cdot 13642,42^a \cdot 1074,761^z \cdot 0,00437^y, \quad (12, \text{ строка } 7)$$

$$0,021407 = C \cdot 16678,03^a \cdot 879,1406^z \cdot 0,003575^y, \quad (13, \text{ строка } 10)$$

$$0,003172 = C \cdot 14713,81^a \cdot 996,5016^z \cdot 0,001961^y, \quad (14, \text{ строка } 13)$$

$$0,00535 = C \cdot 15749,49^a \cdot 930,972^z \cdot 0,001832^y. \quad (15, \text{ строка } 14)$$

Разделим условное уравнение (10) на условное уравнение (12), уравнение (11) на уравнение (14) и уравнение (13) на уравнение (15), а полученные выражения прологарифмируем. В результате имеем:

$$0,352811 = -a \cdot 0,093218 + z \cdot 0,093218 + y \cdot 0,51684721, \quad (16)$$

$$2,706231 = a \cdot 0,1253059 - z \cdot 0,12531 + y \cdot 1,02422823, \quad (17)$$

$$1,386536 = a \cdot 0,0572844 - z \cdot 0,05728 + y \cdot 0,66862067. \quad (18)$$

Система уравнений (16-18) содержит три неизвестных. Путем вычислений найдем их значения:

$$a = 3,488633, \quad (19)$$

$$z = -7,142345, \quad (20)$$

$$y = 1,341602. \quad (21)$$

Подставив полученные значения показателей степеней в выражения (10-15), определим коэффициент C в каждом выражении (10-15), и найдем среднее значение $C=1,48 \cdot 10^8$. Тогда искомое эмпирическое критериальное уравнение примет вид:

$$u = 1,48 \cdot 10^8 \cdot Re_z^{3,489} \cdot K^{-7,142} \cdot \left(\frac{w_{жс}}{w_z} \right)^{1,342}. \quad (22)$$

Уравнение (22) получено для следующих условий: $Re_z=12400-16600$; $K=880-1180$; $w_{жс}/w_z=0,00173-0,007328$; $\rho_{жс}/\rho_z=0,8595$; $\mu_{жс}/\mu_z=63,687$.

Уравнение (22) может быть использовано при проектировании абсорбционных аппаратов с регулярной ударно-распылительной насадкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
2. **Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г.** Процессы и аппараты химической технологии. Ангарск: АГТА, 2006. 754 с.
3. **Андреев М.В., Бальчугов А.В., Бадеников А.В., Коробочкин В.В.** Гидродинамические исследования слоя ударно-распылительной насадки в режиме орошения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. №12, 2017. С. 116-123.