к снижению достоверности результатов расчета. Адекватность полученной математической модели (модели в дифференциальных уравнениях) проверяется далее в ходе экспериментальных исследований.

Таким образом, при изучении процессов и аппаратов химической технологии необходимо обоснованно подходить к выбору метода исследования, что позволит обеспечить высокую достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Батунер Л.М., Позин М.Е.** Математические методы в химической технике. Л., Химия, 1968, 824 с.
2. **Бальчугов А.В., Бадеников А.В.** Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Учебное пособие. Гриф ДВ РУМЦ. Ангарск, АнГТУ, 2021, 179 с.
3. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л., Химия, 1987, 576 с.
4. **Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучёв В.Г.** Процессы и аппараты химической технологии. Ангарск, АГТА, 2006, 754 с.
5. **Архипов В.А., Коноваленко А.И.** Практикум по теории подобия и анализу размерностей. Учебное пособие. Томск, ТГУ, 2016, 93 с.
6. **Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А.** Теории подобия и размерностей. Моделирование. М., Высшая школа, 1968, 208 с.

УДК 66.021.3

Бальчугов Алексей Валерьевич,
д.т.н., доцент 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

ОБЩИЙ ВИД КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ В ЭКСГАУСТЕРЕ

Balchugov A.V., Badenikov A.V.

GENERAL FORM OF THE CRITERION EQUATION FOR THE PROCESS OF SEPARATION OF A GAS-DROPLET MIXTURE IN AN EXHAUSTER

Аннотация. *Получен общий вид критериального уравнения процесса разделения газокапельной смеси в эксгаустере методом анализа размерностей. Показано, что уравнение процесса содержит че-тыре безразмерных критерия, три из которых являются определяющими.*

Ключевые слова: *эксгаустер, теория подобия, критериальное уравнение, метод анализа размерностей.*

Abstract. *A general form of the criterial equation for the separation process of a gas-droplet mixture in an exhauster was obtained using dimensional analysis. It was shown that the process equation contains four dimensionless criteria, three of which are decisive.*

Keywords: *exhauster, similarity theory, criterial equation, dimensional analysis method.*

В эксгаустере происходит отделение капель жидкости от газа за счет центробежной силы [1]. Эксгаустер, как правило, представляет собой цилиндрический аппарат с установленным в нем соосно вентилятором. Газокапельный поток взаимодействует с вращающимися лопастями вентилятора, и под действием центробежной силы капли отбрасываются к стенке аппарата. Капли жидкости оседают на стенках, образуют пленку, которая под действием силы тяжести стекает вниз по стенкам, после чего жидкость отводится из аппарата.

На основе метода анализа размерностей получим общий вид критериального уравнения для процесса отделения капель жидкости от газа в эксгаустере.

Эффективность очистки газа от капель в эксгаустере может быть выражена отношением объемного содержания капель в газе после эксгаустера и до него: ω/ω_0. К параметрам, влияющим на эффективность очистки, относятся: D – диаметр крыльчатки вентилятора (он равен диаметру эксгаустера), м; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; N – частота вращения диска, с$^{-1}$; g – ускорение свободного падения, м/с^2; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/(м·с); w – приведенная скорость жидкости, м/с; d – средний диаметр капель, м.

Приведенная скорость жидкости связана с объемным расходом жидкости и диаметром эксгаустера:

$$w = \frac{V}{S} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{V}{\pi \cdot R^2},$$

где V – объемный расход жидкости, м^3/с; S – площадь поперечного сечения эксгаустера, м^2; R – радиус эксгаустера, м.

Зависимость эффективности очистки газа от других параметров имеет вид:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = f\left(D, \rho, N, g, \mu, w, d\right). \quad (1)$$

Процесс разделения газа и капель жидкости в эксгаустере относится к механическим процессам. Первичными (основными) единицами измерения в таких процессах являются: килограммы (единица измерения массы [M]), метры (единица измерения длины [L]), секунды (единица измерения времени [T]).

Эффективность разделения ω/ω_0 является безразмерной величиной, ее можно рассматривать как самостоятельный критерий подобия.

Представим параметры процесса через первичные (основные) единицы измерения (табл. 1):

$$[D] = [L]^1 [M]^0 [T]^0, \quad (2)$$

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

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

$$[g] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-2}, \quad (5)$$

$$[\mu] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}, \quad (6)$$

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

$$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0. \quad (8)$$

Таблица 1 – Размерности величин

Величина	Размерность	Формула размерности	Показатели степени [L]	Показатели степени [M]	Показатели степени [T]
D	м	$[D]=[L]^1[M]^0[T]^0$	1	0	0
ρ	кг/м^3	$[\rho]=[L]^{-3}[M]^1[T]^0$	-3	1	0
N	1/с	$[N]=[L]^0[M]^0[T]^{-1}$	0	0	-1
g	м/с^2	$[g]=[L]^1[M]^0[T]^{-2}$	1	0	-2
μ	кг/(м·с)	$[\mu]=[L]^{-1}[M]^1[T]^{-1}$	-1	1	-1
w	м/с	$[w]=[L]^1[M]^0[T]^{-1}$	1	0	-1
d	м	$[d]=[L]^1[M]^0[T]^0$	1	0	0

Примем за основные величины D, ρ, g. Число основных величин, как правило, равняется числу первичных (основных) единиц измерения: *кг*, *с*, *м*.

Из уравнений (2, 3, 5) для единиц измерения D, ρ, g составим систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} [D] &= [L]^{l_1} [M]^{m_1} [T]^{t_1} \\ [\rho] &= [L]^{l_2} [M]^{m_2} [T]^{t_2} \\ [g] &= [L]^{l_3} [M]^{m_3} [T]^{t_3} \end{aligned}\right\}. \quad (9)$$

Прологарифмируем:

$$\left.\begin{aligned} \lg[D] &= l_1 \lg[L] + m_1 \lg[M] + t_1 \lg[T] \\ \lg[\rho] &= l_2 \lg[L] + m_2 \lg[M] + t_2 \lg[T] \\ \lg[g] &= l_3 \lg[L] + m_3 \lg[M] + t_3 \lg[T] \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Система уравнений (10) будет справедлива (т.е. будет иметь единственное решение), если составленный из коэффициентов уравнения определитель матрицы отличен от нуля.

По методу треугольника вычислим определитель матрицы, составленной по данным таблицы 1 для величин D, ρ, g:

$$\Delta = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & t_1 \\ l_2 & m_2 & t_2 \\ l_3 & m_3 & t_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{vmatrix} = 1 \cdot 1 \cdot (-2) + 1 \cdot 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 \cdot (-3) - \\ -1 \cdot 1 \cdot 0 - 0 \cdot (-2)(-3) - 0 \cdot 0 \cdot 1 = -2 \neq 0 \quad (11)$$

Как видно из (11), определитель матрицы не равен нулю, следовательно, основные величины D, ρ, g выбраны верно.

Три параметра процесса образуют два безразмерных критерия подобия:

$$\Pi_1 = \frac{\omega}{\omega_0}, \qquad (12)$$

$$\Pi_2 = \frac{d}{D}. \qquad (13)$$

Число оставшихся переменных величин (параметров процесса) равно j=6. Количество первичных (основных) единиц измерения равно f=3. В соответствии с теоремой подобия [2-8] число критериев подобия, описывающих разделение газа и капель в эксгаустере, равно j–f=3.

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

Критерии подобия будут иметь вид:

$$\Pi_3 = \frac{N}{D^k \cdot \rho^m \cdot g^n}, \qquad (14)$$

$$\Pi_4 = \frac{\mu}{D^e \cdot \rho^p \cdot g^i}, \qquad (15)$$

$$\Pi_5 = \frac{w}{D^x \cdot \rho^y \cdot g^z}. \qquad (16)$$

Представим зависимость (1) в виде, отражающем связь между безразмерными критериями:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = f\left(\frac{d}{D}; \frac{N}{D^k \cdot \rho^m \cdot g^n}; \frac{\mu}{D^e \cdot \rho^p \cdot g^i}; \frac{w}{D^x \cdot \rho^y \cdot g^z}\right), \qquad (17)$$

т.е.

$$\Pi_1 = f\left(\Pi_2; \Pi_3; \Pi_4; \Pi_5\right).$$

В правой части уравнения (17) безразмерной является величина:

$$\frac{N}{D^k \cdot \rho^m \cdot g^n}, \qquad (18)$$

следовательно, справедливо выражение:

$$\frac{[N]}{[D]^k \cdot [\rho]^m \cdot [g]^n} = 1, \qquad (19)$$

или

$$\frac{[T]^{-1}}{[L]^k \cdot \left([M][L]^{-3}\right)^m \cdot \left([L][T]^{-2}\right)^n} = 1. \qquad (20)$$

$$[M]^{-m} [L]^{3m-n-k} [T]^{2n-1} = 1. \qquad (21)$$

Равенство (21) выполняется, если:

$$\left.\begin{array}{c} -m = 0 \\ 3m - n - k = 0 \\ 2n - 1 = 0 \end{array}\right\}, \qquad (22)$$

откуда:

$$m = 0, \quad n = 0{,}5, \quad k = -0{,}5.$$

Безразмерный критерий подобия (14) принимает вид:

$$\Pi_3 = \frac{N}{D^{-0{,}5} \cdot \rho^0 \cdot g^{0{,}5}} = \frac{D \cdot N^2}{g}.$$

В уравнении (17) безразмерным является также выражение:

$$\frac{\mu}{D^e \cdot \rho^p \cdot g^i},$$

тогда

$$\frac{[\mu]}{[D]^e \cdot [\rho]^p \cdot [g]^i} = 1, \qquad (23)$$

или

$$\frac{[M][L]^{-1}[T]^{-1}}{[L]^e \cdot \left([M][L]^{-3}\right)^p \cdot \left([L][T]^{-2}\right)^i} = 1. \qquad (24)$$

$$[M]^{1-p} [L]^{3p-i-e-1} [T]^{2i-1} = 1. \qquad (25)$$

Равенство (25) выполняется, если:

$$\left.\begin{array}{c} 1 - p = 0 \\ 3p - i - e - 1 = 0 \\ 2i - 1 = 0 \end{array}\right\}, \qquad (26)$$

откуда:

$$p = 1, \quad i = 0{,}5, \quad e = 1{,}5.$$

Безразмерный критерий подобия (15) принимает вид:

$$\Pi_4 = \frac{\mu}{D^{1{,}5} \cdot \rho \cdot g^{0{,}5}}.$$

В уравнении (17) безразмерным является выражение:

$$\frac{w}{D^x \cdot \rho^y \cdot g^z},$$

тогда

$$\frac{[w]}{[D]^x \cdot [\rho]^y \cdot [g]^z} = 1, \qquad (27)$$

или

$$\frac{[L][T]^{-1}}{[L]^x \cdot \left([M][L]^{-3}\right)^y \cdot \left([L][T]^{-2}\right)^z} = 1. \qquad (28)$$

$$[M]^{-y} [L]^{3y-z-x+1} [T]^{2z-1} = 1. \qquad (29)$$

Равенство (29) выполняется, если:

$$\left.\begin{array}{c} -y = 0 \\ 3y - z - x + 1 = 0 \\ 2z - 1 = 0 \end{array}\right\}, \qquad (30)$$

откуда:

$$y = 0, \quad z = 0{,}5, \quad x = 0{,}5.$$

Безразмерный критерий подобия (16) принимает вид:

$$\Pi_5 = \frac{w}{D^{0,5} \cdot g^{0,5}} \cdot \quad (31)$$

Разделим критерий Π_5 на Π_4, получим:

$$\Pi_6 = \frac{\Pi_5}{\Pi_4} = \frac{w}{D^{0,5} \cdot g^{0,5}} \cdot \frac{D^{1,5} \cdot \rho \cdot g^{0,5}}{\mu} = \frac{w \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \mathrm{Re} \quad . (32)$$

Критерий Π_6 представляет собой критерий Рейнольдса.

Зависимость между безразмерными критериями подобия принимает вид:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = f\left(\frac{d}{D}; \frac{D \cdot N^2}{g}; \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}\right), \quad (33)$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{\alpha} \left(\frac{D \cdot N^2}{g}\right)^{\beta} \left(\frac{w \cdot D \cdot \rho}{\mu}\right)^{\gamma} . \quad (34)$$

С целью определения значений коэффициента C и показателей степени α, β, γ планируется провести экспериментальные исследования лабораторного эксгаустера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Старк С.Б.** Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Металлургия, 1990, 400 с.
2. **Батунер Л.М., Позин М.Е.** Математические методы в химической технике. Л., Химия, 824 с.
3. **Архипов В.А., Коноваленко А. И.** Практикум по теории подобия и анализу размерностей. Учебное пособие. Томск, ТГУ. – 2016, 93 с.
4. **Алабужев П.М., Геронимус В. Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А.** Теории подобия и размерностей. Моделирование. М., Высшая школа, 1968, 208 с.
5. **Иовенко В.В.** Начальные сведения по теории подобия и моделирования. Хабаровск, Издат. ТОГУ, 2019, 260 с.
6. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М., Химия, 1973, 752 с.
7. **Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г.** Процессы и аппараты химической технологии. Ангарск, АГТА, 2006, 754 с.
8. **Бальчугов А.В., Бадеников А.В.** Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Учебное пособие. Ангарск, АнГТУ, 2021, 178 с.