

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

КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКА ГАЗА В ЖИДКОСТИ

Balchugov A.V.

CRITERIAL EQUATION OF MOTION OF A GAS BUBBLE IN A LIQUID

Аннотация. Экспериментально определены коэффициенты и показатели степени критериального уравнения движения пузырька газа в жидкости.

Ключевые слова: пузырек газа, движение, критериальное уравнение, экспериментальные исследования.

Abstract. The coefficients and exponents of the criterion equation for the motion of a gas bubble in a liquid were experimentally determined.

Keywords: gas bubble, motion, criterion equation, experimental studies.

Скорость движения пузырька газа в жидкости оказывает влияние на время контакта газа и жидкости, а также на газосодержание газожидкостного слоя на массообменных устройствах ректификационных и абсорбционных колонн [1, 2]. В работе [3] методом анализа размерностей получен общий вид критериального уравнения для процесса всплытия одиночного пузырька в жидкости:

$$\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \varphi \left(\frac{\rho_g}{\rho}; \frac{w^2}{g \cdot d}; \frac{w^2 \cdot \rho \cdot d}{\sigma} \right), \quad (1)$$

или

$$Re = \varphi(\rho'; Fr; We), \quad (2)$$

$$Re = C \cdot (\rho')^\alpha \cdot Fr^\beta \cdot We^\gamma, \quad (3)$$

где критерий Fr – безразмерный критерий Фруда; We – критерий Вебера; ρ_g – плотность газа, кг/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, кг/(м·с); d – диаметра пузырька, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, кг/с². В уравнениях (2-3):

$$\rho' = \frac{\rho_g}{\rho},$$

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

$$We = \frac{w^2 \cdot \rho \cdot d}{\sigma},$$

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}.$$

Целью настоящего исследования является экспериментальное определение значений коэффициента C и показателей степени α , β , γ в уравнении (3).

Выполнена серия экспериментов со всплыванием одиночных пузырьков воздуха в горячей воде (70 °С) и холодной воде (20 °С) при атмосферном давлении 720 мм рт.ст. Физические свойства воды и воздуха определены по справочникам [4, 5].

Таблица

Результаты экспериментов

<i>N</i>	<i>d</i> , м	<i>w</i> , м/с	<i>T</i> , °С	<i>Re</i>	ρ'	<i>Fr</i>	<i>We</i>	<i>Re</i> расчетн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0006	0.047	20	28.19	0.001142	0.37624	0.01817	28.19
2	0.0007	0.056	20	39.24	0.001142	0.45919	0.03018	39.24
3	0.0010	0.103	20	102.42	0.001142	1.07301	0.14394	102.42
4	0.0015	0.105	20	157.22	0.001142	0.74924	0.22614	157.22
5	0.0020	0.140	20	280.35	0.001142	1.00506	0.53930	280.35
6	0.0008	0.093	20	73.97	0.001142	1.09335	0.09387	73.97
7	0.0005	0.066	20	33.10	0.001142	0.89659	0.03007	33.10
8	0.0002	0.037	20	7.40	0.001142	0.70073	0.00376	7.40
9	0.0004	0.067	20	26.90	0.001142	1.15660	0.02482	26.90
10	0.00045	0.070	20	31.44	0.001142	1.10998	0.03015	31.44
11	0.0005	0.093	70	112.10	0.000992	1.74936	0.06514	112.10
12	0.0010	0.113	70	274.30	0.000992	1.30932	0.19502	274.30
13	0.0006	0.072	70	104.50	0.000992	0.87982	0.04718	104.50
14	0.0006	0.097	70	141.18	0.000992	1.60587	0.08611	141.18
15	0.0012	0.093	70	269.04	0.000992	0.72890	0.15634	269.04
16	0.0005	0.099	70	119.74	0.000992	1.99604	0.07433	119.74
17	0.0005	0.070	70	85.16	0.000992	1.00958	0.03759	85.16
18	0.0010	0.076	70	183.43	0.000992	0.58553	0.08721	183.43
19	0.0007	0.130	70	220.85	0.000992	2.47459	0.18061	220.85
20	0.0011	0.153	70	406.74	0.000992	2.16301	0.38983	406.74
21	0.0003	0.055	70	39.67	0.000992	1.01442	0.01360	39.67
22	0.0006	0.084	70	122.47	0.000992	1.20842	0.06480	122.47

При 70 °С коэффициент динамической вязкости воды составил 0,000404 кг/(м·с); коэффициент поверхностного натяжения воды 0,0644 кг/с²; плотность воздуха 0,97 кг/м³; плотность воды 977,80 кг/м³. При 20 °С коэффициент дина-

мической вязкости воды 0,00100 кг/(м·с); коэффициент поверхностного натяжения воды 0,0730 кг/с²; плотность воздуха 1,14 кг/м³; плотность воды 998,23 кг/м³.

При проведении экспериментов осуществлялась видеосъемка. Результаты экспериментов представлены в таблице.

По экспериментальным данным, приведенным в таблице, методом наименьших квадратов [6-8] определено значение коэффициента C и значения показателей степеней α , β , γ в критериальном уравнении (3). Расчет выполнен с помощью функции «линейн» в программе Excel. В результате получено: $C=6,06787 \cdot 10^{-15}$; $\alpha=-5,732318$; $\beta=-0,25$; $\gamma=0,75$.

Критериальное уравнение (3) принимает вид:

$$Re = 6,06787 \cdot 10^{-15} \cdot (\rho')^{-5,732318} \cdot Fr^{-0,25} \cdot We^{0,75} . \quad (4)$$

По критериальному уравнению (4) выполнен расчет значений критерия Рейнольдса для экспериментальных данных (таблица). Расчетные значения критерия Рейнольдса приведены в графе 9 таблицы. Видно, что расчетные значения критерия Re соответствуют экспериментальным значениям (графа 5 таблицы).

Таким образом, критериальное уравнение (4) позволяет определить скорость всплытия пузырька газа в жидкости при следующих условиях: $0,376 < Fr < 2,4746$; $0,00376 < We < 0,5393$; $0,000992 < \rho' < 0,001142$. Критериальное уравнение (4) может быть использовано при проектировании и разработке массообменных контактных устройств химических и нефтехимических производств.

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.
3. **Архипов В.А., Коноваленко А.И.** Практикум по теории подобия и анализу размерностей. Учебное пособие. Томск: ТГУ, 2016.
4. **Павлов К.Р., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов. – СПб.: Химия, 2000.
5. **Дытнерский Ю.И.** Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. М.: Химия, 1991.
6. **Коломиец Л.В., Поникарова Н.Ю.** Метод наименьших квадратов / Самара: Изд-во Самарского университета, 2017.
7. **Студеникина Л.И., Шевцова Т.В.** Метод наименьших квадратов. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011.
8. **Бальчугов А.В., Бадеников А.В.** Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Ангарск: АНГТУ, 2021.