

УДК 66.021.3

Бальчугов Алексей Валерьевич,

д.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: balchug@mail.ru

Бадеников Артем Викторович,

к.т.н., ректор, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: rector@angtu.ru

Саблина Ирина Логиновна,

магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: irina-batorova@rambler.ru

Антонов Дмитрий Владимирович,

магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: nir@angtu.ru

Крамаренко Анастасия Александровна,

магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: nir@angtu.ru

МАССООТДАЧА ПРИ ИСПАРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОНВЕКЦИИ

Balchugov A. V., Badenikov A. V., Sablina I. L., Antonov D. V., Kramarenko A. A.

MASSTRANSFER DURING EVAPORATION UNDER FORCED CONVECTION CONDITIONS

Аннотация. Получен общий вид критериального уравнения для процесса испарения жидкости в условиях принудительной конвекции методом анализа размерностей. Критериальное уравнение включает в себя такие критерии подобия как критерий Рейнольдса и критерий Шмидта.

Ключевые слова: испарение, массоотдача, критериальное уравнение, критерий Шмидта.

Abstract. The general form of the criterial equation for the process of liquid evaporation under forced convection conditions is obtained by the method of dimensional analysis. The criterial equation includes such similarity criteria as the Reynolds criterion and the Schmidt criterion.

Keywords: evaporation, mass transfer, criterial equation, Schmidt criterion.

Процесс охлаждения воды в градирнях атмосферным воздухом сопровождается испарением воды [1]. Испарение приводит к большим потерям оборотной воды и к необходимости восполнения воды в системе. Интенсивность испарения воды в условиях принудительной конвекции может быть описана критериальным уравнением [2]. Целью работы является получение общего вида критериального уравнения для процесса испарения воды в условиях принудительной конвекции на основе метода анализа размерностей [3, 4]. Данное уравнение необходимо для разработки и проектирования устройств, предназначенных для охлаждения и испарения горячей воды.

К параметрам, описывающим процесс

испарения в условиях принудительной конвекции, относятся: β – коэффициент массоотдачи в воздухе, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кг}/\text{м}^3))$ или $\text{м}/\text{с}$; d – геометрический параметр системы, например, высота элемента регулярной насадки, м ; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; w – скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$. Зависимость коэффициента массоотдачи от параметров процесса имеет вид:

$$\beta = f(d, \rho, \mu, D, w). \quad (1)$$

Процесс испарения жидкости в условиях принудительной конвекции относится к массообменным процессам. При этом первичными (основными) единицами измерения

процесса испарения будут следующие: килограммы (единица измерения массы $[M]$), метры (единица измерения длины $[L]$), секунды (единица измерения времени $[T]$).

Запишем единицы измерения всех параметров процесса через первичные (основные) единицы измерения:

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

$$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0, \quad (3)$$

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

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

$$[D] = [L]^2 [M]^0 [T]^{-1}, \quad (6)$$

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

Внесем сведения о параметрах процесса в таблицу 1. Произвольно примем за основные величины D, μ, d . Число основных величин равно числу первичных (основных) единиц измерения: кг, с, м.

Таблица 1 – Параметры процесса

Величина	Размерность	Показатели степени		
		$[L]$	$[M]$	$[T]$
β	м/с	1	0	-1
d	м	1	0	0
ρ	кг/м ³	-3	1	0
μ	кг/(м·с)	-1	1	-1
D	м ² /с	2	0	-1
w	м/с	1	0	-1

Из уравнений (3, 5, 6) для d, μ, D составим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} [D] &= [L]^{l_1} [M]^{m_1} [T]^{t_1} \\ [\mu] &= [L]^{l_2} [M]^{m_2} [T]^{t_2} \\ [d] &= [L]^{l_3} [M]^{m_3} [T]^{t_3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Прологарифмируем:

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

Система уравнений (9) будет иметь единственное решение, если составленный из коэффициентов уравнения определитель матрицы не равен нулю.

Вычислим определитель матрицы, составленной по данным таблицы 1 для основ-

ных величин D, μ, d :

$$\Delta = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & t_1 \\ l_2 & m_2 & t_2 \\ l_3 & m_3 & t_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot 1 \cdot 0 + 0 \cdot (-1) \cdot 1 + (-1) \cdot (-1) \cdot 0 - (-1) \cdot 1 \cdot 1 - 2 \cdot (-1) \cdot 0 - 0 \cdot (-1) \cdot 0 = 1 \neq 0 \quad (10)$$

Таким образом, определитель матрицы отличен от нуля, следовательно, основные величины D, μ, d выбраны верно.

Как видно из (1), число параметров процесса равно $n=6$. Количество первичных (основных) единиц измерения равно $m=3$. В соответствии с П-теоремой подобия [2] число критериев подобия, описывающих испарение жидкости, равно $n-m=3$.

Критерии подобия можно получить делением каждой оставшейся величины (β, ρ, w) на произведение основных величин (D, μ, d), возведенных в степени.

В результате получим:

$$\Pi_1 = \frac{\beta}{D^a \cdot \mu^b \cdot d^c}, \quad (11)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho}{D^k \cdot \mu^l \cdot d^m}, \quad (12)$$

$$\Pi_3 = \frac{w}{D^e \cdot \mu^p \cdot d^i}. \quad (13)$$

Представим функцию (1) в виде, отражающей связь между полученными безразмерными критериями:

$$\frac{\beta}{D^a \cdot \mu^b \cdot d^c} = \varphi \left(\frac{\rho}{D^k \cdot \mu^l \cdot d^m}; \frac{w}{D^e \cdot \mu^p \cdot d^i} \right), \quad (14)$$

т.е.

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2; \Pi_3).$$

Так как левая часть уравнения (14) является безразмерной величиной, то справедливым будет выражение:

$$\frac{[\beta]}{[D]^a \cdot [\mu]^b \cdot [d]^c} = 1, \quad (15)$$

или

$$\frac{[L][T]^{-1}}{\left([L]^2 [T]^{-1}\right)^a \cdot \left([M][L]^{-1} [T]^{-1}\right)^b \cdot [L]^c} = 1 \quad (16)$$

Тогда:

$$[M]^{-b} [L]^{1-2a+b-c} [T]^{-1+a+b} = 1. \quad (17)$$

Равенство (17) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} -b &= 0 \\ 1 - 2a + b - c &= 0 \\ -1 + a + b &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

откуда:

$$b = 0, \quad c = -1, \quad a = 1.$$

Получим первый критерий подобия (11):

$$Pi_1 = \frac{\beta \cdot d}{D}.$$

Можно записать критерий Pi_1 также в виде:

$$Pi_1 = Nu = \frac{\beta \cdot d}{D}.$$

Критерий $Pi_1 = Nu$ – диффузионный критерий Нуссельта.

В выражении (14) безразмерной является также дробь:

$$\frac{\rho}{D^k \cdot \mu^l \cdot d^m}, \quad (19)$$

тогда

$$\frac{[\rho]}{[D]^k \cdot [\mu]^l \cdot [d]^m} = 1, \quad (20)$$

или

$$\frac{[M][L]^3}{([L]^2[T]^{-1})^k \cdot ([M][L]^{-1}[T]^{-1})^l \cdot [L]^m} = 1. \quad (21)$$

$$[M]^{1-l} [L]^{-3-2k+l-m} [T]^{k+l} = 1. \quad (22)$$

Выражение (22) справедливо, если:

$$\left. \begin{aligned} 1 - l &= 0 \\ -3 - 2k + l - m &= 0 \\ k + 1 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

откуда:

$$m = 0, \quad l = 1, \quad k = -1.$$

Безразмерный критерий подобия (12) будет иметь следующий вид:

$$Pi_2 = \frac{D \cdot \rho}{\mu}.$$

Данный критерий можно записать также в виде:

$$Pi_2 = Sc = \frac{\mu}{D \cdot \rho}.$$

Критерий $Pi_2 = Sc$ – критерий Шмидта.

В уравнении (14) безразмерным будет также выражение:

$$\frac{w}{D^e \cdot \mu^p \cdot d^i}, \quad (24)$$

тогда

$$\frac{[w]}{[D]^e \cdot [\mu]^p \cdot [d]^i} = 1, \quad (25)$$

или

$$\frac{[L][T]^{-1}}{([L]^2[T]^{-1})^e \cdot ([M][L]^{-1}[T]^{-1})^p \cdot [L]^i} = 1. \quad (26)$$

$$[M]^{-p} [L]^{1-2e+p-i} [T]^{-1+e+p} = 1. \quad (27)$$

Выражение (27) будет справедливым, если:

$$\left. \begin{aligned} -p &= 0 \\ 1 - 2e + p - i &= 0 \\ -1 + e + p &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

откуда:

$$p = 0, \quad e = 1, \quad i = -1.$$

Безразмерный критерий подобия (13) запишется в виде:

$$Pi_3 = \frac{w \cdot d}{D}.$$

В идеальном газе коэффициент диффузии D [м²/с] равен коэффициенту кинематической вязкости ν [м²/с]. Тогда получим:

$$Pi_3 = \frac{w \cdot d}{D} = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = Re.$$

Критерий $Pi_3 = Re$ – критерий Рейнольдса.

Зависимость между безразмерными критериями подобия для процесса испарения в условиях принудительной конвекции:

$$\frac{\beta \cdot d}{D} = \varphi \left(\frac{\mu}{D \cdot \rho}; \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \right), \quad (29)$$

или

$$Nu = \varphi(Sc; Re), \quad (30)$$

$$Nu = C \cdot Sc^x \cdot Re^z, \quad (31)$$

где C, x, z – константы, определяемые экспериментально.

Полученное уравнение (31) согласуется с уравнением, приведенным в работе [2] для процесса испарения. Таким образом, метод анализа размерностей позволяет получить общий вид критериального уравнения для определения интенсивности испарения воды в условиях принудительной конвекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов Б. А., Бадеников В. Я., Ликучёв В. Г. Процессы и аппараты химической технологии. – Ангарск: АГТА, 2006. – 744 с.
2. Батунер Л. М., Позин М. Е. Математические методы в химической технике. – Л.: Химия, 1987. – 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.

УДК 665.72

Былков Василий Александрович,
студент кафедры «Химическая технология топлива»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: danilkrabovv@gmail.com

Раскулова Татьяна Валентиновна
д.х.н., зав. кафедрой «Химическая технология топлива»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: raskulova@list.ru

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГАЗОВЫХ КОНДЕНСАТОВ КОВЫКТИНСКОГО И СРЕДНЕВИЛЮЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Bylkov V.A., Raskulova T.V.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES
OF GAS CONDENSATES FROM KOVYKTINSKY AND SREDNEVILYUYSKY FIELDS

Аннотация. Рассмотрены физико-химические свойства стабильных газовых конденсатов Ковыктинского и Средневилюйского месторождений. Показаны отличия физико-химических свойств, группового и фракционного состава газоконденсата различных месторождений.

Ключевые слова: стабильный газовый конденсат, групповой углеводородный состав, фракционный состав.

Abstract. The physicochemical properties of stable gas condensates of the Kovyktinskoye and Srednevilyuyskoye fields are considered. The differences in physical and chemical properties, group and fractional composition of gas condensate from various fields are shown.

Keywords: stable gas condensate, hydrocarbon type content, fractional breakdown.

За последние годы мировой уровень добычи природного газа и газоконденсата увеличился в несколько раз. Для России, имеющей около 47,8 трлн. м³ разведанных запасов природного газа на планете, данный тип углеводородов является не только эффективным энергоресурсом, но и важнейшим средством решения экономических проблем [1].

Россия по праву считается одним из лидеров по разработкам, добыче и поставкам природного газа на мировой рынок (рис. 1). Природа щедро наградила её этим видом сырья, к настоящему времени разработано и освоено около двухсот месторождений по добыче газа и газового конденсата. Наиболее значимые месторождения природного газа

были открыты в 60-х – 80-х годах прошлого столетия [2]. Основные залежи были обнаружены в районах Заполярья, Северо-Западной Сибири и на дальнем Востоке. Некоторые (Уренгойское, Ямбургское) газовые месторождения РФ являются крупнейшими в мире и относятся к уникальным, то есть имеющим запасы более 5 трлн. м³ газа.

В ведущих российских нефтегазодобывающих компаниях всё чаще актуализируются вопросы о разработке газоконденсатных месторождений. Основным отличием газоконденсатов от традиционного природного газа является наличие значительного количества жидких углеводородов (C₅ и выше) различного состава.