

УДК 66.02

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

Баранова Альбина Алексеевна,
к.т.н., доцент кафедры ПГС, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: baranova2012aa@mail.ru

КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА СЕДИМЕНТАЦИИ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

Balchugov A. V., Badenikov A. V., Baranova A. A.

CRITERION EQUATION FOR THE SEDIMENTATION PROCESS IN THE TRANSITION REGIME

Аннотация. Методом анализа размерностей получен общий вид критериального уравнения для процесса осаждения твердых частиц в слое жидкости. Данное уравнение соответствует уравнению, полученному аналитическим методом другими исследователями. Экспериментально определены коэффициенты уравнения для процесса осаждения частиц песка в переходном режиме.

Ключевые слова: седиментация, очистка сточных вод, критериальное уравнение.

Abstract. Using the method of dimensional analysis, a general form of the criterion equation for the process of deposition of solid particles in a layer of liquid is obtained. The coefficients of the equation for the process of sedimentation of sand particles in the transition regime were determined experimentally.

Keywords: sedimentation, wastewater treatment, criterion equation.

Седиментация (осаждение) является одним из методов очистки сточных вод от механических примесей. Как правило, в промышленных отстойниках осаждение частиц осуществляется в ламинарном или переходном режиме. Целью исследования является получение общего вида критериального уравнения для процесса осаждения частиц песка на основе метода анализа размерностей [1, 2] и экспериментальное определение для переходного режима коэффициентов полученного критериального уравнения.

К параметрам процесса, влияющим на скорость осаждения частицы песка в жидкости (w , м/с) относятся: d – диаметр частицы, м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; $(\rho_m - \rho_{жс})$ – разность плотностей частицы и жидкости, кг/м³. Зависимость скорости осаждения частицы от параметров имеет вид:

$$w_{oc} = f(d, \rho_{жс}, (\rho_m - \rho_{жс}), \mu_{жс}, g). \quad (1)$$

Процесс осаждения твердой частицы в жидкости относится к механическим процессам. Первичными (основными) единицами

измерения в таких процессах являются: килограммы (единица измерения массы [М]), метры (единица измерения длины [L]), секунды (единица измерения времени [Т]).

Представим единицу измерения скорости осаждения частицы через первичные (основные) единицы измерения:

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

$$\text{т.е.} \quad \frac{M}{c} = M^1 \cdot Kc^0 \cdot c^{-1}. \quad (3)$$

Аналогично запишем для остальных параметров процесса:

$$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0, \quad (4)$$

$$[\rho_{жс}] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (5)$$

$$[\rho_m - \rho_{жс}] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0, \quad (6)$$

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

$$[\mu_{жс}] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}. \quad (8)$$

Внесем сведения о размерности величин в таблицу 1.

Из уравнений (4, 5, 8) для единиц измерения $d, \rho_{ж}, \mu_{ж}$ составим систему уравнений:

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

Таблица 1 – Размерности величин

Величина	Размерность	Формула размерности	Показатели степени		
			[L]	[M]	[T]
w_{oc}	м/с	$[w_{oc}] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-1}$	1	0	-1
d	м	$[d] = [L]^1 [M]^0 [T]^0$	1	0	0
$\rho_{ж}$	кг/м ³	$[\rho] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0$	-3	1	0
$\rho_m - \rho_{ж}$	кг/м ³	$[\rho] = [L]^{-3} [M]^1 [T]^0$	-3	1	0
g	м/с ²	$[g] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-2}$	1	0	-2
$\mu_{ж}$	кг/(м·с)	$[\mu_{ж}] = [L]^{-1} [M]^1 [T]^{-1}$	-1	1	-1

Прологарифмируем:

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

Система уравнений (10) будет справедлива (т.е. будет иметь единственное решение), если составленный из коэффициентов уравнения определитель матрицы отличен от нуля [1].

По методу треугольника вычислим определитель матрицы, составленной по данным таблицы 1 для величин $d, \rho_{ж}, \mu_{ж}$:

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

Как видно из (11), определитель матрицы не равен нулю, следовательно, основные величины $d, \rho_{ж}, \mu_{ж}$ выбраны верно.

Число переменных величин (параметров процесса) равно $z=6$. Количество первичных (основных) единиц измерения равно $q=3$. В соответствии с теоремой подобия число критериев подобия, описывающих течение песка из отверстия, равно $z-q=3$.

Критерии подобия получаются делением каждой оставшейся величины ($w_{oc}, (\rho_m - \rho_{ж}), g$) на произведение основных величин ($d, \rho_{ж}, \mu_{ж}$), возведенных в степени. Критерии

подобия будут иметь вид:

$$\Pi_1 = \frac{w_{oc}}{d^a \cdot \rho_{ж}^b \cdot \mu_{ж}^c}, \quad (12)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho_m - \rho_{ж}}{d^k \cdot \rho_{ж}^l \cdot \mu_{ж}^m}, \quad (13)$$

$$\Pi_3 = \frac{g}{d^e \cdot \rho_{ж}^p \cdot \mu_{ж}^c}. \quad (14)$$

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

$$\frac{w_{oc}}{d^a \cdot \rho_{ж}^b \cdot \mu_{ж}^c} = \phi \left(\frac{\rho_m - \rho_{ж}}{d^k \cdot \rho_{ж}^l \cdot \mu_{ж}^m}; \frac{g}{d^e \cdot \rho_{ж}^p \cdot \mu_{ж}^c} \right), \quad (15)$$

т.е.

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

Левая часть уравнения (15) – безразмерная величина, следовательно, справедливо выражение:

$$\frac{[w_{oc}]}{[d]^a \cdot [\rho_{ж}]^b \cdot [\mu_{ж}]^c} = 1, \quad (16)$$

или

$$\frac{[L]^1 [T]^{-1}}{[L]^a \cdot ([M] [L]^{-3})^b \cdot ([M] [L]^{-1} [T]^{-1})^c} = 1. \quad (17)$$

Тогда:

$$[M]^{-b-c} [L]^{1-a+3b+c} [T]^{-1+c} = 1. \quad (18)$$

Равенство (18) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} -b - c &= 0 \\ 1 - a + 3b + c &= 0 \\ -1 + c &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

откуда:

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

Критерий подобия (12) примет вид:

$$\Pi_1 = Re = \frac{w_{oc} \cdot d \cdot \rho_{ж}}{\mu_{ж}}.$$

Критерий $\Pi_1=Re$ называется критерием Рейнольдса.

В уравнении (15) безразмерным является также выражение:

$$\frac{\rho_m - \rho_{ж}}{d^k \cdot \rho_{ж}^l \cdot \mu_{ж}^m}, \quad (20)$$

тогда

$$\frac{[\rho_m - \rho_{ж}]}{[d]^k \cdot [\rho_{ж}]^l \cdot [\mu_{ж}]^m} = 1, \quad (21)$$

или

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

$$[M]^{1-l-m} [L]^{-3-k+3l+m} [T]^m = 1. \quad (23)$$

Равенство (23) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} 1-l-m &= 0 \\ -3-k+3l+m &= 0 \\ m &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

откуда:

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

Безразмерный критерий подобия (13) принимает вид:

$$\Pi_2 = \frac{\rho_m - \rho_{жс}}{\rho_{жс}}.$$

В уравнении (15) безразмерным является выражение:

$$\frac{g}{d^e \cdot \rho_{жс}^p \cdot \mu_{жс}^c},$$

тогда

$$\frac{[g]}{[d]^e \cdot [\rho_{жс}]^p \cdot [\mu_{жс}]^c} = 1, \quad (25)$$

или

$$\frac{[L][T]^{-2}}{[L]^e \cdot ([M][L]^{-3})^p \cdot ([M][L]^{-1}[T]^{-1})^c} = 1. \quad (26)$$

$$[M]^{-p-c} [L]^{1-e+3p+c} [T]^{c-2} = 1. \quad (27)$$

Равенство (27) выполняется, если:

$$\left. \begin{aligned} -p-c &= 0 \\ 1-e+3p+c &= 0 \\ c-2 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

откуда:

$$c = 2, \quad p = -2, \quad e = -3.$$

Безразмерный критерий подобия (14) принимает вид:

$$\Pi_3 = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_{жс}^2}{\mu_{жс}^2}.$$

Произведение критериев Π_2 и Π_3 называется критерием Архимеда:

$$Ar = \Pi_2 \cdot \Pi_3 = \frac{\rho_m - \rho_{жс}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_{жс}^2}{\mu_{жс}^2} = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_m - \rho_{жс}) \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс}^2}. \quad (29)$$

Зависимость между безразмерными критериями подобия для процесса осаждения принимает вид:

$$\frac{w_{ос} \cdot d \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс}} = \varphi \left(\frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_m - \rho_{жс}) \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс}^2} \right), \quad (30)$$

или

$$Re = \varphi(Ar). \quad (31)$$

Зависимость (31) можно представить в виде:

$$Re = m \cdot Ar^n. \quad (32)$$

Уравнение (32) соответствует уравнению, приведённому в работе [3] и полученному аналитическим методом. Коэффициенты выражения (32) можно определить только экспериментально.

Выполнены эксперименты по осаждению единичных частиц песка в воде. Диаметр частиц песка составлял 0,001-0,003 м. Истинная плотность частиц составляла 2650 кг/м³. Высота слоя воды 0,4 м. Температура воды 17 °С. Результаты экспериментов представлены на рисунке 1.

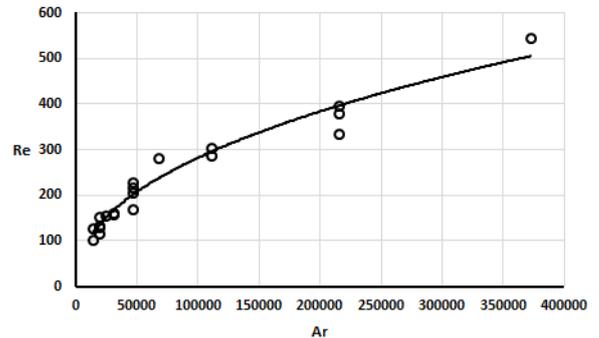


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость критерия Re от критерия Ar при осаждении частиц песка.

В экспериментах частицы осаждались в переходном режиме, т.к. $2 < Re < 500$ [3].

Графическая зависимость на рисунке 1 описывается уравнением:

$$Re = 1,7326 \cdot Ar^{0,4424}. \quad (33)$$

Величина достоверности аппроксимации уравнения (33) составляет 0,9583.

Полученное критериальное уравнение (33) может использоваться при проектировании отстойников, предназначенных для грубой очистки сточных вод от частиц песка в переходном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабужев, П.М. Теории подобия и размерностей. Моделирование. / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус, Л.М. Минкевич, Б.А. Шеховцов. – М.: Высш. шк., 1968. – 208 с.
2. Иовенко, В.В. Начальные сведения по теории подобия и моделирования. – Хабаровск: Издат. ТОГУ, 2019. – 260 с.
3. Набока, В.В. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Часть I «Гидромеханические процессы». / В.В. Набока, Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, В.М. Соломонова. – Ангарск, АНГТУ, 2018. – 44 с.

УДК 678.742.2 : 66.018.83

Гененко Наталия Ивановна,
магистрант, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: natashamiss@mail.ru
Черниговская Марина Алексеевна,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: pm888@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВОВЛЕЧЕНИЯ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Genenko N.I., Chernigovskaya M.A.

FEATURES OF USING SECONDARY RAW MATERIALS IN THE POLYMER FILMS PRODUCTION

Аннотация. Рассмотрены особенности использования вторичного полимерного сырья при производстве полимерных пленок.

Ключевые слова: полимерные материалы, модификация, вторичные полимеры.

Abstract. The features of using recycled polymer raw materials in the production of polymer films are considered.

Keywords: polymer materials, modification, recycled polymers.

В настоящее время полимерные материалы широко распространены не только в быту, но и в других областях человеческой деятельности. Они применяются в промышленности, в медицине, в строительстве, автомобиле- и авиастроении. Вместе с этим образуется большое количество полимерных отходов, получаемых не только в процессе производства полимеров, но и после эксплуатации полимеров и изделий из них.

Классическими способами решения проблемы отходов, в том числе и полимерных, являются:

1. Разработка новых способов применения отходов производства – позволяет перерабатывать отходы, полученные в технологическом процессе, сохраняя свойства материалов и получая продукцию достаточно хорошего качества;
2. Переработка отходов потребления в другие продукты – позволяет перерабатывать бывшие в употреблении материалы в изделия иного назначения, при этом возможна некоторая потеря свойств материала;

ла;

3. Вовлечение вторичного сырья в технологический процесс [1].

Метод вовлечения вторичного сырья в технологический процесс в настоящее время широко применяется в полимерной промышленности. Например, при переработке полиэтилена высокого давления методом экструзии при производстве пленок в состав полимерной композиции могут вводиться отходы производства полиэтилена различных марок в виде гранулята или капсулята.

Вовлечение вторичного сырья в переработку считается наиболее эффективным методом по ряду причин. Во-первых, это позволяет экономить первичное сырье, а, следовательно, и затраты на производство такой продукции также будут снижаться. Во-вторых, возврат вторичного сырья в производственный цикл означает снижение количества отходов и, как следствие, затрат на их обезвреживание или утилизацию. В конечном итоге это позволяет снизить себестоимость конечной продукции, а также умень-