УДК 66.069.82

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ

© 2021 г. А. М. Трушин^{*a*}, М. А. Носырев^{*a*, *}, Л. В. Равичев^{*a*}, В. Е. Яшин^{*a*}

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия *e-mail: vnissok@list.ru

Поступила в редакцию 09.10.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 20.11.2020 г.

Получены уравнения для расчета скорости начала псевдоожижения и начала полного псевдоожижения, учитывающие зависимость коэффициентов сопротивления от порозности в области предварительного расширения слоя перед полным псевдоожижением.

Ключевые слова: скорость начала псевдоожижения, полное псевдоожижение, коэффициент сопротивления

DOI: 10.31857/S0040357121020123

введение

В наиболее распространенном методе расчета скорости начала псевдоожижения (V_{кр}) перепад давления в слое, рассчитанный по уравнению Эргуна, приравнивается весу частиц слоя, отнесенному к площади поперечного сечения слоя, за вычетом подъемной силы Архимеда, пропорциональной плотности сплошной фазы. В уравнении для перепада давления используется порозность, близкая к порозности неподвижного слоя. Такой метод расчета, который может считаться стандартным, приводится в большинстве литературных источников, касающихся исследования процесса псевдоожижения [1-4], а также в учебной литературе последних изданий [5-8]. К сожалению, стандартный метод расчета содержит некоторые противоречия. Прежде всего, противоречием является то, что в баланс сил в начале псевдоожижения для сферических частиц подставляется порозность, равная 0.4, тогда как полное псевдоожижение начинается при несколько расширенном слое, при этом порозность увеличивается приблизительно на 10% до величины $\varepsilon = 0.44$ [3]. Это противоречие исчезает, если принять, что скорость начала псевдоожижения соответствует порозности слоя сферических частиц (0.4), которая превышает среднюю порозность неподвижного слоя сфер (0.38). Это свидетельствует о том, что при таком подходе начало псевдоожижения соответствует несколько расширенному слою по сравнению с неподвижным и отличается от начала полного псевдоожижения. Такое определение скорости начала псевдоожижения приближенно соответствует методу его определения по пересечению касательных на графике $\Delta P = f(v)$. Существенным противоречием является принятие коэффициентов сопротивления при расширении слоя до полного псевдоожижения постоянными, тогда как при скоростях, значительно меньших скорости начала псевдоожижения, наблюдается движение частиц [1]. Увеличение порозности слоя, сопровождающееся движением частиц, влияет на величину коэффициентов сопротивления.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ НАЧАЛА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ И ПОЛНОГО ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ

Коэффициенты сопротивления λ в неподвижном слое, принятые в уравнении Эргуна, определяются по следующим формулам:

$$\lambda_1 = \frac{133}{\text{Re}}; \quad \text{Re} = \frac{\nu d_{\Rightarrow} \rho}{\mu} < 0.2; \quad \lambda_2 = 2.34;$$

 $\text{Re} > 7000,$
(1)

где V — скорость в каналах неподвижного слоя; $d_{9} = \frac{2\varepsilon d}{3(1-\varepsilon)}$ — эквивалентный диаметр каналов; d — диаметр сферических частиц. Коэффициент сопротивления входит в уравнение, определяющее перепад давления в слое:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d_2} \frac{\rho v^2}{2}, \qquad (2)$$

где *H* – высота слоя.

Наличие движения частиц при увеличении порозности в области предварительного расширения слоя приводит к тому, что скорость сплошной фазы на поверхности частиц становится большей нуля, что приводит к падению коэффициентов сопротивления и их зависимости от порозности.

Таким образом, для ламинарного и турбулентного движения имеем

$$\lambda_1 = \frac{k_1(\varepsilon)}{\operatorname{Re}}; \quad \lambda_2 = k_2(\varepsilon). \tag{3}$$

Чтобы найти функцию $k_1(\varepsilon)$ и $k_2(\varepsilon)$, на основе уравнений (1), (2) получим выражения для чисел Рейнольдса, рассчитываемых по приведенной скорости в конце стадии предварительного расширения слоя.

В ламинарной и автомодельной области:

$$\operatorname{Re}_{\pi} = \frac{8}{9k_{1}(\varepsilon)} \frac{\varepsilon^{3}}{(1-\varepsilon)} \operatorname{Ar}, \qquad (4)$$

$$\operatorname{Re}_{\pi} = \left(\frac{\varepsilon^{3}\operatorname{Ar}}{0.75k_{2}(\varepsilon)}\right)^{0.5}.$$
 (5)

С учетом выражений для скоростей свободного движения получим отношение приведенных скоростей к скорости витания:

$$f_{1}(\varepsilon) = \frac{\nu_{\pi}}{\nu_{B}} = \frac{16\varepsilon^{3}}{k_{1}(\varepsilon)(1-\varepsilon)},$$
 (6)

$$f_{2}(\varepsilon) = \frac{v_{\pi}}{v_{B}} = \frac{1}{1.73} \left(\frac{\varepsilon^{3}}{0.75k_{1}(\varepsilon)} \right)^{0.5}.$$
 (7)

Известны эмпирические зависимости соотношения скоростей $f_1(\varepsilon) = \varepsilon^n$, $n = 4.65 + 20 \frac{d}{D}$ (Re < 0.2), где d, D – соответственно диаметр частиц и аппарата. Часто используют показатель степени n == 4.75, соответствующий соотношению $\frac{d}{D} = 5 \times 10^{-3}$.

Формула вида, подобного уравнению (6), получена также на основе решения уравнения баланса сил в дифференциальной форме для медленного движения [9]. Таким образом, для ламинарной области имеем

$$f_1(\varepsilon) = \varepsilon^{4.75}.$$
 (8)

Для автомодельной области n = 2.4:

$$f_2(\varepsilon) = \varepsilon^{2.4}.$$
 (9)

Приравняв формулы (6) и (7) к формулам (8) и (9), получим данные для получения зависимостей $k(\varepsilon)$.

Обработка полученных данных в виде степенной зависимости в интервале величин порозности 0.4–0.44 приводит к следующим формулам:

ламинарная область

$$k_1(\varepsilon) = 53\varepsilon^{-1}; \tag{10}$$

автомодельная область

$$k_2(\varepsilon) = 0.9\varepsilon^{-1}.\tag{11}$$

Учитывая незначительное отличие величины порозности 0.4 от средней порозности упаковки сферических частиц 0.38, формулы (10) и (11) могут экстраполироваться до этой величины.

Перепад давления, необходимый для определения скорости начала псевдоожижения, можно найти из баланса сил, действующих на фазы кипящего слоя при ряде допущений, представленных в работах [1, 4]. Эти уравнения элементарны, но необходимость приведения вызвана неоднозначной трактовкой их решения, прежде всего в учебной литературе.

Сумма внешних сил, приходящихся на единицу объема каждой из фаз:

сплошная фаза

$$-\rho g \vec{i} - \nabla P - F_{R,c} \vec{i} = 0; \qquad (12)$$

дисперсная (твердая) фаза

$$-\rho_{\mathrm{T}}g\vec{i} + (\rho_{\mathrm{T}}(1-\varepsilon) + \varepsilon\rho)g\vec{i} + \frac{F_{R,c}\varepsilon}{1-\varepsilon}\vec{i} = 0, \qquad (13)$$

где \vec{i} — единичный вектор, направленный вертикально вверх; $F_{R, c}$ — сила сопротивления, приходящаяся на единицу объема сплошной фазы.

Вторая составляющая уравнения (13) является подъемной силой Архимеда, рассчитанной по удельному весу кипящего слоя. Третья составляющая получена из равенства абсолютных величин сил сопротивления, действующих на объем

каждой из фаз:
$$F_{R,c}V_c = F_{R,\pi}V_{\pi}; \frac{V_{\pi}}{V_{\pi} + V_c} = 1 - \varepsilon.$$

Из уравнения (13) получим силу сопротивления:

$$F_{R,c} = (1 - \varepsilon)(\rho_{\rm T} - \rho)g. \tag{14}$$

Сила сопротивления, приходящаяся на единицу объема слоя:

$$F_{R,c,\pi} = \varepsilon (1 - \varepsilon) (\rho_{\rm T} - \rho) g. \tag{15}$$

Из уравнений (12) и (14) получим градиент давления:

$$\nabla P = -\vec{i} \left((1 - \varepsilon) \rho_{\rm T} g + \varepsilon \rho g \right). \tag{16}$$

В случае газовой сплошной фазы, пренебрегая малой величиной второй составляющей правой части (16), найдем

$$\nabla P = \vec{i} (1 - \varepsilon) \rho_{\rm T} g. \tag{17}$$

После интегрирования получим перепад давления в газовой фазе:

$$\Delta P = (1 - \varepsilon)\rho_{\rm T}gH. \tag{18}$$

Ввиду того что наиболее часто в промышленности псевдоожижающим агентом является газ, для определения скорости начала псевдоожижения и начала полного псевдоожижения будет использовано уравнение (18).

Баланс сил в виде равенства ΔP , определяемого по уравнениям (2) и (18), приводит к следующему уравнению в безразмерных переменных:

$$\frac{9k_1(\varepsilon_{\kappa p})(1-\varepsilon_{\kappa p})}{8\varepsilon_{\kappa p}^3}\operatorname{Re}_{\kappa p} + \frac{3k_2(\varepsilon_{\kappa p})\operatorname{Re}_{\kappa p}^2}{4\varepsilon_{\kappa p}^3} = \operatorname{Ar.} \quad (19)$$

С учетом формул (10) и (11) получим

$$\frac{59.6(1-\varepsilon_{\kappa p})\operatorname{Re}_{\kappa p}}{\varepsilon_{\kappa p}^{4}} + \frac{0.68\operatorname{Re}_{\kappa p}^{2}}{\varepsilon_{\kappa p}^{4}} = \operatorname{Ar.}$$
(20)

При величине критической порозности, равной 0.4, получим квадратное уравнение для определения скорости начала псевдоожижения сферических частиц:

$$\operatorname{Re}_{\kappa p}^{2} + 52.6 \operatorname{Re}_{\kappa p} - 0.0376 \operatorname{Ar} = 0.$$
 (21)

Поскольку уравнение (19) включает в себя зависимость коэффициентов сопротивления от порозности его можно использовать для определения скорости полного псевдоожижения при ориентировочной величине критической порозности, соответствующей концу расширения слоя перед полным псевдоожижением, $\varepsilon_{\rm kp} = 0.44$.

В результате получим следующее уравнение для определения скорости начала полного псевдоожижения сферических частиц:

$$\operatorname{Re}_{\kappa p}^{2} + 49.1 \operatorname{Re}_{\kappa p} - 0.0551 \operatorname{Ar} = 0.$$
 (22)

Уравнение для определения скорости начала псевдоожижения слоя сферических частиц по стандартной методике имеет следующий вид:

$$\operatorname{Re}_{\kappa p}^{2} + 51.4 \operatorname{Re}_{\kappa p} - 0.0366 \operatorname{Ar} = 0.$$
 (23)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коэффициенты полученного уравнения (21) и уравнения (23) стандартной методики незначительно различаются, что свидетельствует о близких величинах скорости начала псевдоожижения, рассчитанных по предложенной и стандартной методике. Учет зависимости коэффициентов сопротивления от порозности позволяет использовать уравнение (20) для определения приближенной величины скорости начала полного псевдоожижения. Расчеты по уравнениям (21) и (22) показывают, что скорость начала полного псевдоожижения может на 54% превышать скорость начала псевдоожижения.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- *F_{R, c}* сила сопротивления слоя, приходящегося на единицу объема сплошной фазы
- g ускорение свободного падения, м/с²
- *і* единичный вектор
- є доля сплошной фазы (порозность)
- λ коэффициент сопротивления
- ρ плотность сплошной фазы, кг/м³
- ρ_T плотность частицы, кг/м³
- Ar число Архимеда

Re_{кр} число Рейнольдса в критической точке

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Davidson J., Harrison F. Fluidization. London: Academic, 1971.

- 2. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдоожижения. М.: Химия, 1967.
- 3. *Мухленов И.П., Сажин Б.С., Фролов В.Ф.* Расчеты аппаратов кипящего слоя. Л.: Химия, 1986.
- Протодьяконов И.О., Чесноков Ю.Г. Гидромеханические основы процессов химической технологии. Л.: Химия, 1987.
- 5. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ТИД Альянс, 2004.
- Разинов А.И., Клинов А.В., Дьяконов Г.С. Процессы и аппараты химической технологии. Казань: КНИТУ, 2017.

- Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. М.: Химия, 1991.
- 8. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанин А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 1. М.: Химия, 1999.
- 9. Trushin A.M., Ravichev L.V., Yashin V.E., Nosyreva M.A., Komlyashev R.B. Semiempirical method for determining the rate of slow hindered motion // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 6. Р. 967. [Трушин А.М., Равичев Л.В., Яшин В.Е., Носырев М.А., Комляшев Р.Б. Полуэмпирический метод определения скорости стесненного медленного движения // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 6. С. 617.]

264