

УДК 542.61
ББК 24.1
С-87

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: 8(861) 2752279;

Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: 8(861) 2752279;

Рудич Евгений Михайлович, кандидат технических наук;

Схалыхов Анзаур Адамович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, тел.: 8(8772) 570412;

Чундышко Вячеслав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и прикладной информатики ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, тел.: 8(8772) 571133.

СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЛОЯ ЭКСТРАГИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА (рецензирована)

В работе проводили исследование влияния массообмена в слое при экстрагировании на структурные параметры. Получены зависимости коэффициента проницаемости слоя от порозности.

Ключевые слова: экстрактор, гидродинамическая неустойчивость, дренаж, CO₂-экстракция.

Koshevoy Eugeni Panteleevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Machines and Equipment for Food Production of FSBEI HPE «Kuban State Technological University», 350072, Krasnodar, 2 Moscow Str., tel.: (861) 2752279;

Kosachev Vyacheslav Stepanovich, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Machines and Equipment for Food Production of Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, 2 Moscow Str., tel.: (861) 2752279;

Rudich Eugeni Michailovich, Candidate of Technical Sciences;

Skhalyakhov Anzaur Adamovich, Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the Department of Technology, Machinery and Food Processing Equipment, dean of the Technological Faculty of FSBEI HPE «Maikop State Technological University», 385000, Republic of Adyghea, Maikop, 191 Pervomayskaya Str., tel.: (8772) 570412;

Chundyshko Vyacheslav Yurievich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, assistant professor of the Department of Information Security and Applied Informatics of FSBEI HPE «Maikop State Technological University», 385000, Republic of Adyghea, Maikop, 191 Pervomayskaya Str., tel.: (8772) 571133.

STRUCTURAL PARAMETERS OF THE EXTRACTED MATERIAL LAYER (reviewed)

The article investigated the influences of mass transfer in a layer on the extraction of the structural parameters. The dependences of the permeability coefficient on the porosity of the layer have been obtained.

Keywords: extractor, hydrodynamic instability, drainage, CO₂ extraction.

При экстрагировании на поверхности частиц при обтекании растворителем образуются пограничные диффузионные и гидродинамические слои, и поэтому при оценке структурных параметров слоя принимаем модель [1], в которой каждая отдельная частица, окружена жидкой пленкой. Рассмотрим слой с частицами одинакового размера. В соответствии с принятой моделью частица радиуса a окружена жидкой пленкой до радиуса aR и эффективной жидкой средой вокруг этого. Вообще относительный размер жидкой пленки R может зависеть от развития гидродинамики и массообмена на поверхности частицы, а также от детальной структуры расположения частиц в слое.

Самый простой выбор параметра относительного размера пленки возможен исходя из структуры пористой среды слоя

$$R_c = (1 - \varepsilon)^{-1/3}, \quad (1)$$

где ε – порозность пористой среды. Этот выбор R_c , так называемый «структурный», эквивалентен соответствию объема пленки объему пустого объема пористой среды слоя с порозностью ε .

Параметр R_s , так называемый «волновой», также структурного характера, связанный с упаковкой твердых частиц в слое, может быть использован [1]:

$$R_s = \{[1 - S(0)] / (1 - \varepsilon)\}^{1/3} \quad (2)$$

Здесь $S(0)$ – нулевое волновое число – фактор структуры упаковки частицы, и ее описание для беспорядочно распределенных монодисперсных сфер дано в работах [2].

Нулевое волновое число – фактор структуры $S(0)$ определено следующим соотношением:

$$S(0) = \int [P(r|0) - n] \cdot dr \quad (3)$$

где $P(r|0)$ – вероятность чтобы найти частицу с ее центром около r , данного испытательную частицу в происхождении, и n – плотность числа частиц. Для беспорядочно распределенных сфер, $S(0)$ дается формулой Carnahan-Starling [2] как:

$$S(0) = \frac{\varepsilon^4}{1 + 4(1 - \varepsilon) + 4(1 - \varepsilon)^2 - 4(1 - \varepsilon)^3 + (1 - \varepsilon)^4} \quad (4)$$

Соотношение толщины гидродинамического δ_h и диффузионного δ_d пограничного слоев, как известно [3], определяется числом Шмидта:

$$\frac{\delta_h}{\delta_d} = Sc = \frac{\nu}{D_m} \quad (5)$$

где $\nu = \mu / \rho$ – коэффициент кинематической вязкости текущей жидкой фазы, выражаемая через коэффициент динамической вязкости μ и плотность ρ жидкой фазы; D_m – коэффициент молекулярной диффузии экстракта в растворитель (двуокись углерода).

Данные по коэффициенту динамической вязкости и плотности двуокиси углерода приводятся в [4].

Расчет коэффициента молекулярной диффузии экстракта в растворитель (двуокись углерода) проводится по уравнению Уилки-Чанга [5]:

$$D_i = 7,4 \cdot 10^{-8} \cdot (\Phi \cdot M)^{0,5} \cdot T / (\eta \cdot V_i^{0,6}), \text{ см}^2/\text{с} \quad (6)$$

где $M = 44$ и $\eta = 64,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па с}$ (0,0641 сП) – соответственно, молекулярный вес и вязкость растворителя (двуокись углерода); $\Phi = 1$ – коэффициент ассоциации; $V_m = 1269,6 \text{ см}^3/\text{моль}$ – молярный объем экстракта.

Толщина диффузионного пограничного слоя определяется по соотношению:

$$\delta_d(\varepsilon) = d / Sh(\varepsilon) \quad (7)$$

где d – диаметр частиц; $Sh(\varepsilon)$ – число Шервуда, которое определяется по уравнениям:

$$Sh(\varepsilon) = \varepsilon_j \cdot Re \cdot Sc^{0,33} / \varepsilon \quad (8)$$

и

$$\varepsilon j_m = \frac{0,765}{Re^{0,82}} + \frac{0,365}{Re^{0,38}} \quad (9)$$

где $Re = d\rho w/\mu$ – число Рейнольдса.

Преобразования представленных зависимостей приводят к параметру относительной толщины диффузионного пограничного слоя для экстрагирования жидкой двуокисью углерода частиц растительного материала:

$$R_\partial = 1 + \frac{2}{Sh(\varepsilon)} Sc \quad (10)$$

Полученные зависимости $R - \varepsilon$ (рис. 1) для различных вариантов определения параметра толщины пленки позволит выполнить расчет проницаемости по зависимостям, полученным в работе [1].

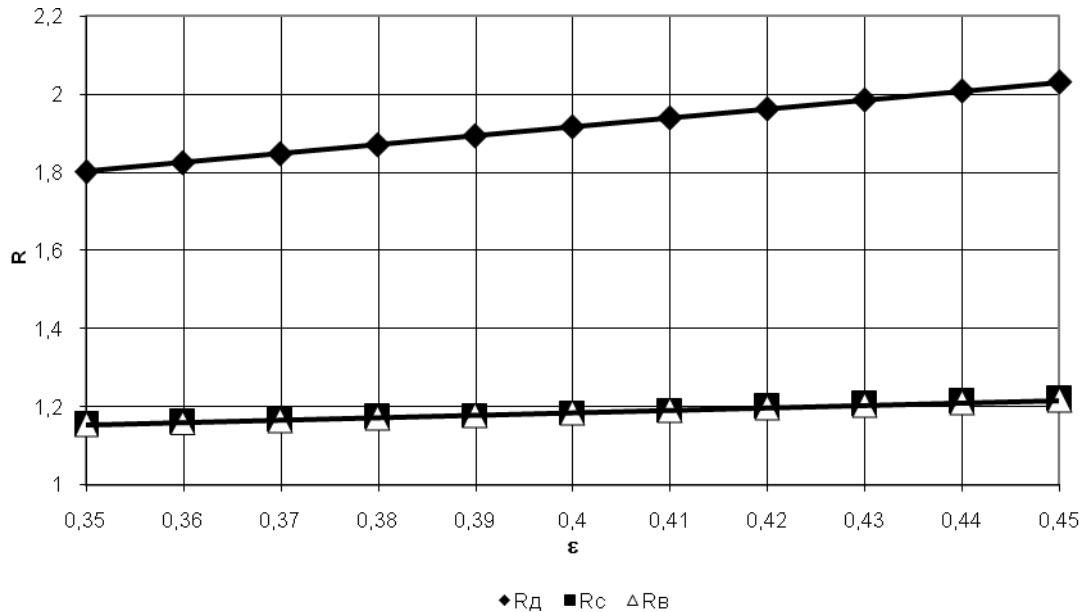


Рис. 1. Зависимости параметров относительной толщины пленки (R_c – структурный; R_v – волновой и R_d – массообменный) от порозности слоя ε

Можно отметить, что структурный и волновой параметры практически совпадают и в представляющем интерес диапазоне изменения порозности зависимость параметра можно представить линейным уравнением регрессии:

$$R(\varepsilon) = 0,6303 \varepsilon + 0,9318 \quad (11)$$

Параметр гидродинамического пограничного слоя, связанного с диффузией, оказался существенно выше структурных параметров и это означает, что объем этого слоя, превышает объем пор слоя и в дальнейших расчетах следует использовать структурные параметры.

В соответствии с представлениями, развитыми в работе [1] область потока вокруг каждой из частиц, которые составляют неподвижный слой все вместе, затрагивает соседние элементы, представленные текучей жидкой средой. Таким образом, каждая частица окружена жидкой средой в виде пленки, которая имеет ту же самую проходимость как полная пористая среда, это определяет общую проницаемость слоя. Такой подход более реалистичен, однако это ведет к несколько более сложной процедуре решения задачи, хотя аналитическое решение было получено [1].

Зависимость для определения параметра α , включающего проницаемость слоя, имеет следующий вид:

$$\alpha^2 = \frac{a^2}{k} = -3(1 - \varepsilon)D \quad (12)$$

$$D = -\frac{6}{Q} [6R^6\alpha^3 + 21\alpha^2R^5 - 5R^4\alpha^3 + 45\alpha R^4 - 5R^3\alpha^2 + 45R^3 - \alpha^3R - \alpha^2] \quad (13)$$

$$Q = 180R^3 + 24R^5\alpha^2 - 45R^4\alpha^2 - 9\alpha^2 + 4\alpha^3 + 180\alpha R^4 + 4R^6\alpha^3 + 10\alpha^3R^3 - 9R\alpha^3 - 9\alpha^3R^5 + 30\alpha^2R^2 - 180R^3\alpha$$

Представленные уравнения (12) и (13) однозначно определяют значение проницаемости k (в виде безразмерного параметра $\alpha^2 = \frac{a^2}{k}$), как только порозность ε (следовательно, R) определена.

Решая полученное трансцендентное уравнение, относительно α получили возможность определить зависимость α^2 от ε (рис. 2) в указанном диапазоне.

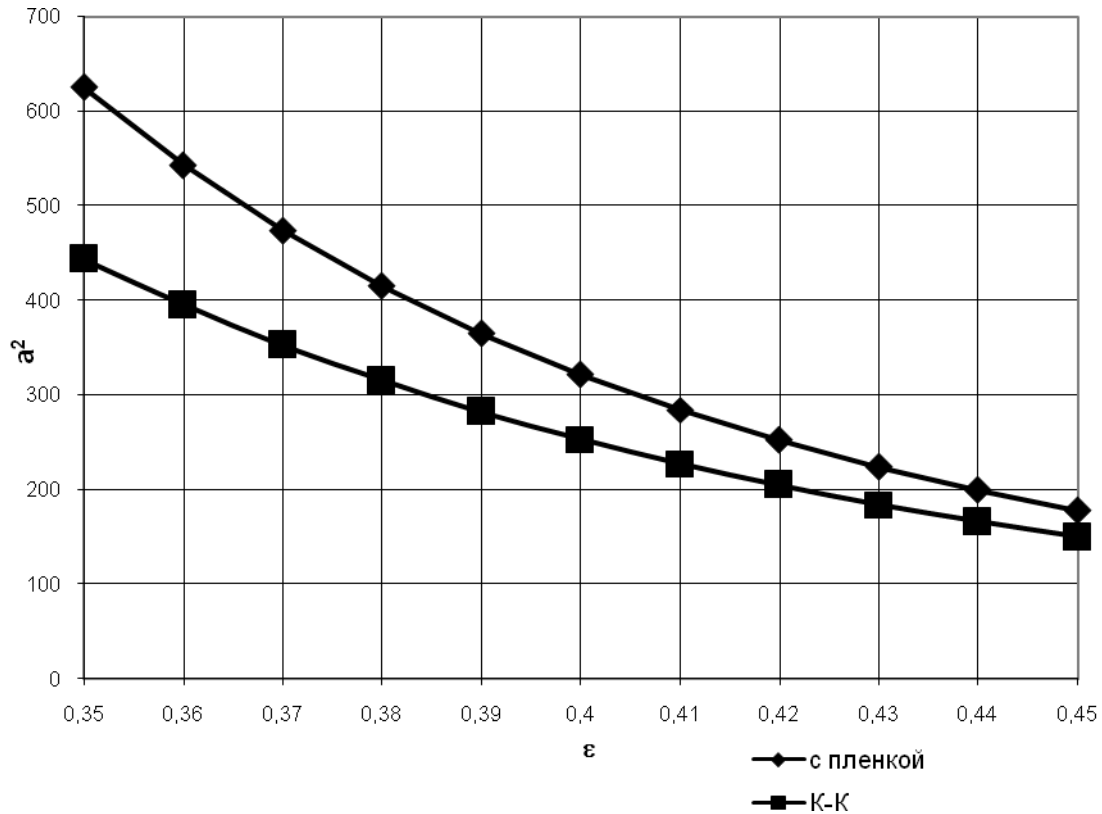


Рис. 2. Зависимость безразмерного числа $\alpha^2 = \frac{a^2}{k}$, включающего проницаемость, от порозности слоя ε

На рисунке 2 дополнительно представлено эмпирическое уравнение Казени-Кармана [6], определяющее коэффициент проницаемости:

$$k = \frac{d^2}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (14)$$

Это уравнение преобразуется к сопоставимому с рассматриваемой зависимостью виду:

$$\alpha^2 = \frac{a^2}{k} = 45 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (15)$$

Можно отметить, что зависимость α^2 для частиц с пленкой на поверхности на рисунке 2 расположена несколько выше, чем зависимость Казени-Кармана, что соответствует меньшему коэффициенту проницаемости для частиц с пленкой на поверхности. С ростом порозности рассматриваемые зависимости сближаются.

ВЫВОДЫ

1. Массообмен в слое при экстрагировании влияет на структурные параметры.
2. Коэффициент проницаемости слоя в ходе процесса экстракции меньше чем коэффициент проницаемости инертного слоя, определяемого по зависимости Казени-Кармана. С ростом порозности слоя разность коэффициентов проницаемости снижается.

Литература:

1. Li Y. C., Park C.-W. Permeability of Packed Beds Filled with Polydisperse Spherical Particles // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998. Vol. 37. P. 2005-2011.
2. Mo G., Sangani A. A method for computing Stokes flow interactions among spherical objects and its application to suspensions of drops and porous particles // *Phys. Fluids.* 1994. Vol. 6. P. 1637.
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. / В.Г. Айнштейн [и др.]; под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Логос: Высшая школа, 2003.
4. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Издательство стандартов, 1975. 546 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
6. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.

References:

1. Li Y. C., Park C.-W. Permeability of Packed Beds Filled with Polydisperse Spherical Particles // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998. Vol. 37. P. 2005-2011.
2. Mo G., Sangani A. A method for computing Stokes flow interactions among spherical objects and its application to suspensions of drops and porous particles // *Phys. Fluids.* 1994. Vol. 6. 1637 p.
3. General course of the processes and devices of chemical technologies: tutorial: in 2 Vol. / V.G. Ainshtein [and oth.]; ed. V.G. Ainshtein. M.: Logos: High School, 2003.
4. Altunin V.V. Thermo-physical properties of carbon dioxide. M: Publishing Standards, 1975. 546 p.
5. Reed R., J. Prausnits, Sherwood T. The Properties of Gases and Liquids: a reference guide. L.: Chemistry, 1982. 592 p.
6. Romankov P.G., Kurotshkina M.I. Hydro-mechanical processes of chemical technology. L.: Chemistry, 1982. 288 p.