

УДК 621.22-278

ББК 31.56

Г-46

Заславец Александр Алексеевич, соискатель кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, т.: (861)2752279;

Схалыхов Анзаур Адамович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», т.: (8772)570412;

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, т.: (861)2752279;

Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, т.: (861)2752279;

Кошевая Софья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета, т.: (861)2752279.

ГИДРАВЛИКА ТЕЧЕНИЯ В МЕМБРАНЕ КОНТАКТОРА

(рецензирована)

В работе описан гидравлический процесс течения в мембране, определялась проницаемость мембраны, зависимости между объемным расходом и трансмембранным давлением.

Ключевые слова: эмульсия, мембрана, трансмембранное давление, фильтрация, проницаемость, гидравлика процесса.

Zaslavets Alexander Alexeevich, seeker of the Department of Machines and Equipment for Food Production, Kuban State Technological University, tel.: (861) 2752279;

Skhalyakhov Anzaur Adamovich, Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the Department of Technology, Machinery and Equipment for Food Production of FSBEI HPE "Maikop State Technological University", tel.: (8772) 570412;

Koshevoy Eugeniï Panteleevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Machines and Equipment for Food Production, Kuban State Technological University, tel.: (861) 2752279;

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

Koshevaya Sophia Eugeniïevna, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Computer Science of the Kuban State Technological University, tel.: (861) 2752279.

FLOW HYDRAULICS IN CONTACTOR MEMBRANE

(Reviewed)

The article describes the hydraulic process of flow in the membrane, the permeability of the membrane and the correlations between flow rate and transmembrane pressure have been determined.

Keywords: emulsion, membrane, transmembrane pressure, filtration, permeability, hydraulic of the process.

Мембранные контакторы, применяемые для приготовления эмульсий, суспензий, полимерных и липидных наночастиц [1] получили возрастающий интерес. Для описания гидравлического процесса течения в мембране необходимо одновременно использовать уравнение неразрывности жидкости и закон фильтрации Дарси. Как правило, скорости потоков как внутри трубчатых мембран, так и через мембрану малы и движение жидкости носит ламинарный характер. По методике работы [20] используем дифференциальные уравнения второго порядка следующего вида:

$$\frac{d^2 P_L}{dx^2} = \frac{16 \cdot K}{R_L^3} (P_L - P_S) \quad (1)$$

$$\frac{d^2 P_S}{dx^2} = \frac{16 \cdot K}{R_L^3} \frac{1}{\gamma} (P_L - P_S) \quad (2)$$

здесь:

$$\gamma = \frac{4R_S^4 \ln(R_S / R_M) + 4R_S^2 R_M^2 - 3R_S^4 - R_M^4}{R_L^4} \quad (3)$$

Решение уравнений (1) и (2):

$$P_L(x) = B_1 \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) + B_2 \operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) + B_3 \frac{x}{L_m} + B_4 \quad (4)$$

$$P_S(x) = -B_1 \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right)}{\gamma} - B_2 \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right)}{\gamma} + B_3 \frac{x}{L_m} + B_4 \quad (5)$$

здесь:

$$\lambda = 4 \sqrt{k \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}, \quad (6)$$

где $k = K \cdot L_m^2 / R_L^3$ – безразмерная мембранная проницаемость; K – проницаемость мембраны, м; L_m – длина мембраны, м; R_L и R_M – внутренний и внешний радиус мембраны соответственно, м; R_S – радиус мембранного модуля, м; n – количество мембран в мембранном модуле.

Расходы внутри и снаружи мембраны в зависимости от изменения давления:

$$Q_L = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} \cdot L_m \frac{dP_L}{dx} \quad (7)$$

$$Q_S = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} \cdot \gamma \cdot L_m \frac{dP_S}{dx}, \quad (8)$$

где значения производных:

$$\frac{dP_L}{dx} = B_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \frac{\lambda}{L_m} + B_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m} + B_3 \frac{1}{L_m} \quad (9)$$

$$\frac{dP_S}{dx} = -B_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m \cdot \gamma} - B_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m \cdot \gamma} + B_3 \frac{1}{L_m} \quad (10)$$

Значения расходов по длине:

$$Q_L(x) = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} \cdot L_m \cdot \left(B_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \frac{\lambda}{L_m} + B_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m} + B_3 \frac{1}{L_m} \right) \quad (11)$$

$$Q_S(x) = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} \cdot \gamma \cdot L_m \left(-B_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m \cdot \gamma} - B_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda \cdot x}{L_m}\right) \cdot \frac{\lambda}{L_m \cdot \gamma} + B_3 \frac{1}{L_m} \right) \quad (12)$$

Значения расходов в крайних точках:

$$Q_{L,0} = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} (B_1 \lambda + B_3) \quad (13)$$

$$Q_{L,1} = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} [B_1 \lambda \operatorname{ch}(\lambda) + B_2 \lambda \operatorname{sh}(\lambda) + B_3] \quad (14)$$

$$Q_{S,0} = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} (-B_1 \lambda + B_3 \gamma) \quad (15)$$

$$Q_{S,1} = -\frac{n\pi R_L^4}{8\mu L_m} [B_1 \lambda \operatorname{ch}(\lambda) + B_2 \lambda \operatorname{sh}(\lambda) - B_3 \gamma] \quad (16)$$

где индексы 0 и 1 обозначают $x = 0$ и $x = L_m$ положения, соответственно.

Значения B_1 , B_2 , B_3 и B_4 для случая с открытыми патрубками определяются по варианту №6 [2]:

$$B_2 = \frac{(P_{L,0} - P_{S,0})}{1 + 1/\gamma} \quad (17)$$

$$B_1 = \frac{P_{L,1} - P_{S,1} - B_2 \cdot \operatorname{ch}(\lambda) \cdot (1 + 1/\gamma)}{\operatorname{sh}(\lambda) \cdot (1 + 1/\gamma)} \quad (18)$$

$$B_3 = B_2 + P_{L,1} - P_{L,0} + \frac{P_{S,1} - P_{L,1}}{1 + 1/\gamma} \quad (19)$$

$$B_4 = P_{L,0} - B_2 \quad (20)$$

Для анализа процесса с использованием представленных зависимостей необходимы данные по коэффициенту проницаемости. Исследования мембранного процесса формирования эмульсий проводились на лабораторной установке [3, 4], которая представляет собой двухконтурный гидравлический стенд, позволяющий регулировать перепад давлений во внутреннем (водяном) и внешнем (масляном) контуре.

При определении проницаемости использовали трубчатые керамических мембран произведенных фирмой НПО «Керамик-фильтр» (Москва). Трубчатая мембрана имела наружный диаметр 10 мм, толщина стенки 2 мм и длина 800 мм, площадь фильтрации 0,015 м².

В данном исследовании фильтруемой средой использовалось подсолнечное масло с динамической вязкостью $\mu = 0,045$ Па·с. На рисунке 1 представлена схема приложения давлений в мембранном модуле.

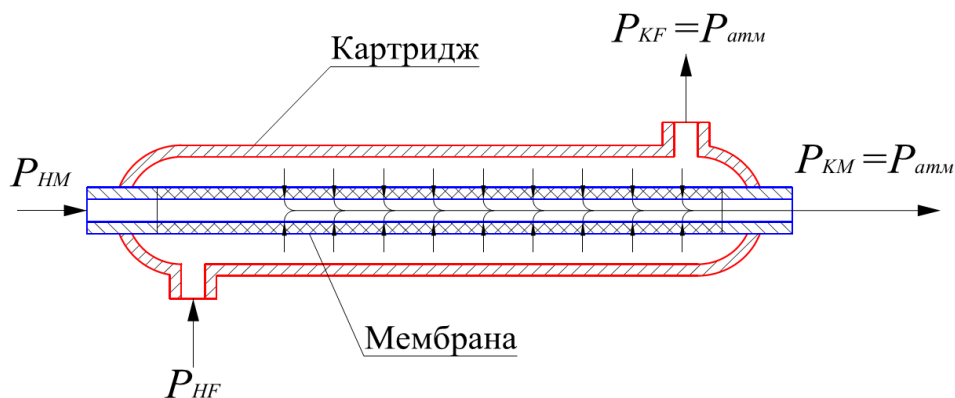


Рис. 1. Схема приложенных давлений в мембранном модуле при определении проницаемости

Трансмембранное давление определяли из соотношения:

$$\Delta P = (P_H - P_S) = \frac{P_{HF} + P_{KF}}{2} - \frac{P_{HM} + P_{KM}}{2} \quad (21)$$

где $P_{KF} = P_{KM} = 101,33$ кПа – атмосферное давление.

С учетом формулы (13) и (14), расход фильтрата определяется:

$$\Delta Q = Q_{L,1} - Q_{L,0} = \frac{n\pi R_L^4}{8\mu L} (B_1\lambda + B_3) - \frac{n\pi R_L^4}{8\mu L} [B_1\lambda ch(\lambda) + B_2\lambda sh(\lambda) + B_3] \quad (22)$$

Уравнение (22) относительно параметра мембранной проницаемости K является трансцендентным и может быть решено численно. Поэтому, имея экспериментальные данные по объемному расходу фильтруемой среды в единицу времени, определили значение проницаемости керамической мембраны. Вычисление осуществлялось в среде инженерно-математических расчетов Mathcad 14.0 с помощью специализированного набора встроенных функций: given и find.

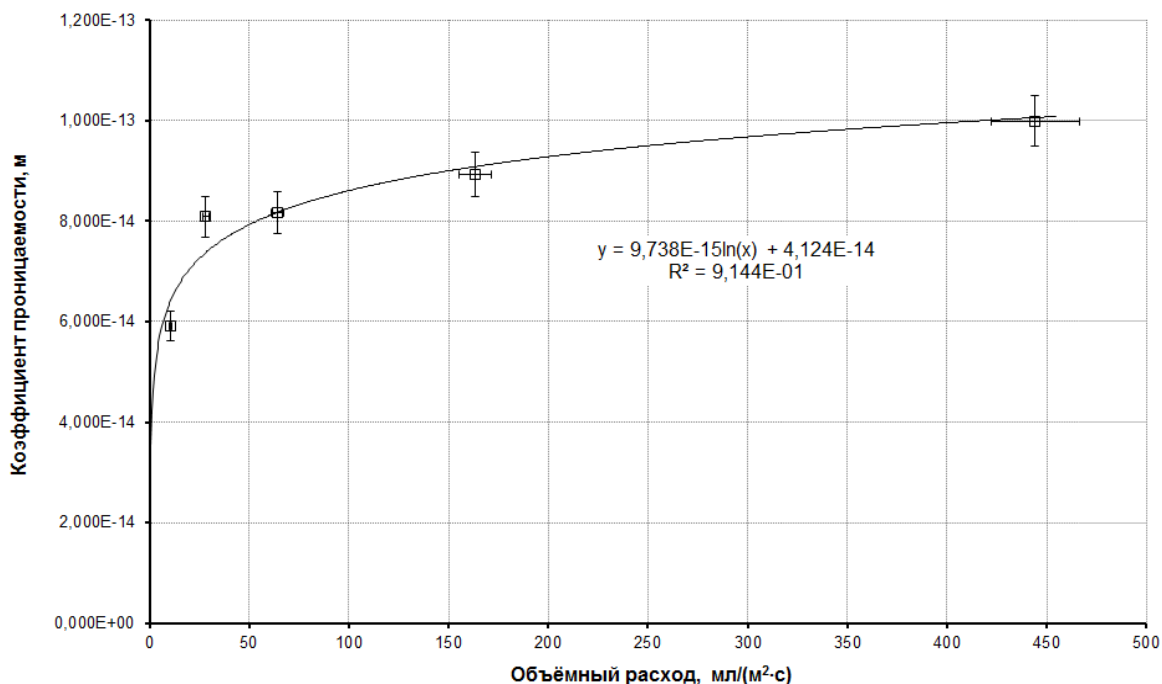


Рис. 2. График зависимости коэффициента проницаемости от объёмного расхода с наложенной линией тренда
 Результаты эксперимента по определению проницаемости представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Определение проницаемости керамической мембраны при фильтрации подсолнечного масла

№ п/п	Значение давлений, кПа					Объёмный расход фильтрата ΔQ , мл/(м ² ·с)	Коэффициент проницаемости K , м
	P_{HM}	P_{KM}	P_{HF}	P_{KF}	ΔP		
1	147,10	101,33	166,71	101,33	9,81	10,32	$5,920 \times 10^{-14}$
2	196,13	101,33	235,36	101,33	19,61	28,2	$8,088 \times 10^{-14}$
3	245,17	101,33	333,43	101,33	44,13	64,1	$8,170 \times 10^{-14}$
4	294,20	101,33	500,14	101,33	102,97	163,4	$8,926 \times 10^{-14}$
5	343,23	101,33	843,37	101,33	250,07	444,1	$9,990 \times 10^{-14}$

График зависимости проницаемости от объёмного расхода с наложенной линией тренда представлен на рисунке 2:

$$K = 9,738 \times 10^{-15} \cdot \ln(\Delta Q) + 4,124 \times 10^{-14}, \text{ м} \quad (22)$$

Такой асимптотический характер зависимости объясняется тем, что при наличии прямой зависимости между объёмным расходом и трансмембранным давлением с ростом давления увеличивается количество пор, через которые происходит течение. Достижение асимптотического предела означает включение в процесс всех пор мембраны.

Литература:

1. Charcosset C. Membrane processes in biotechnology: an overview // *Biotechnol. Adv.* 2006. Vol. 24. P. 482-492.
2. Labecki M., Piret J. M., Bowen B. D. Two-dimensional analysis of fluid flow in hollow-fibre modules // *Chem. Engng Sci.* 1995. Vol. 50. P. 3369-3384.
3. Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Процесс мембранного эмульгирования // Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах («ЭПАХПП-2011»): материалы Междунар. научно-техн. интернет-конф. Воронеж, 2011. С. 53-57.
4. Моделирование мембранного процесса формирования нано - и миниэмульсий / Х.Р. Блягоз [и др.] // *Новые технологии.* 2011. №2. С. 15-17.

References:

1. Charcosset C. Membrane processes in biotechnology: an overview// *Biotechnol. Adv.* 2006. Vol. 24. P. 482-492.
2. Labecki M., Piret J. M., Bowen B. D. Two-dimensional analysis of fluid flow in hollow-fibre modules // *Chem. Engng Sci.* 1995. Vol. 50 .P. 3369-3384.
3. Zaslavets A.A., Koshevoy E.P., Kosachev V.S. The process of membrane emulsification // *Energy-saving processes and machines in food and chem. Production (EPAHPP – 2011): materials of Intern.*

Scientific and Technical Internet conference. Voronezh, 2011. P. 53-57.

4. Simulation of the membrane process of formation of nano-and mini emulsions / H.R. Blyagoz [and oth.] // New Technologies. 2011. №2. P. 15-17.