

## **Определение проницаемости мембраны для технологии формирования капельных структур**

Блягоз Х.Р., Схаляхов А.А., Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С.  
[arama75@mail.ru](mailto:arama75@mail.ru)

Майкопский государственный технологический университет  
Кубанский государственный технологический университет

*Формирование капельных структур с использованием полволоконных и трубчатых мембран получает широкое распространение в различных отраслях промышленности, в том числе и в пищевой. Важным является выбор мембран и оценка их основного показателя – проницаемости. Для описания процесса разделения на мембране необходимо одновременно использовать уравнение неразрывности жидкости и закон фильтрации Дарси. В работе определены проницаемость керамической трубчатой мембраны и в зависимости от режимов работы установки определены доля липидов в эмульсии и размер получаемых капель.*

Ключевые слова: мембрана, проницаемость, фильтрация, размер капель

## **Determination of a membrane permeability for technology of formation of drop structures**

Bljagoz H.R., Shaljahov A.A., Zaslavets A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S.  
[arama75@mail.ru](mailto:arama75@mail.ru)

Maikop state technological university  
Kuban state technological university

*Separation of liquid mixes with hollow-fiber and tubular membranes is widely extended in various industries, including the food industry. The choice of membranes and their basic indicator estimation – permeability is important. It is necessary to use simultaneously the equation of a liquid indissolubility and the law of the filtration of Darsi for the description of separation process on a membrane. Permeability of a ceramic tubular membrane is defined and depending on operating modes of installation a share of lipids in emulsions and the size of received drops are determined*

Keywords: a membrane, permeability, a filtration, size of drops

Мембранные технологии, в том числе при формировании капельных структур, получают широкое распространение в пищевой, косметической и медицинской промышленности [1]. Специфические свойства мембран определяются материалами, из которых они изготавливаются, а также внешней и внутренней структурой. Важным является такой параметр мембран как проницаемость.

При определении проницаемости трубчатых керамических мембран, произведенных фирмой НПО «Керамикфильтр» (Москва), для обеспечения ламинарного режима применялась методика «тупиковой» фильтрации. Трубчатая мембрана имела наружный диаметр 10 мм, толщину стенки 3 мм и длину 800 мм. В опытах с закрытым выходом из внутреннего объема мембраны контролировали расход фильтрата воды при температуре 20-25°C при различных избыточных давлениях на входе во внутренний объем мембраны.

Для описания гидродинамики процесса проницания мембраны 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. Для случая постоянного давления с внешней стороны мембраны и пренебрежением изменением давления по радиусу мембраны в работе [2] предложено обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка следующего вида:

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

где  $P_L$  и  $P_s$  – соответственно гидростатическое давление внутри и снаружи мембраны, Па;  $r_p$  - мембранная проницаемость, м;  $R_L$  - внутренний радиус мембраны, м;  $x$  - координата по оси мембраны, м.

Решение может быть получено операторным методом Лапласа [3]:

$$P_L = P_s + A_1 \cdot sh \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot x \right) + A_2 \cdot ch \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot x \right) \quad (2)$$

Постоянные интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  определяются из начальных или граничных условий реализации потоков. В данном случае переменная  $x$  определена на интервале  $0 \leq x \leq L$ .

В случае «тупиковой» фильтрации [4], для закрытого патрубка принимается производная давления равной нулю. В результате функция распределения давления для рассматриваемой «тупиковой» фильтрации принимает вид:

$$P_L = P_s + (P_H - P_s) \frac{ch \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot (L - x) \right)}{ch \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot L \right)} \quad (3)$$

В общем случае зависимость объемной производительности во внутреннем объеме мембраны:

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

где  $n$  – количество мембран;  $\mu$  – динамическая вязкость фильтруемой жидкости, Па·с.

Определяем скорость потока по полученному профилю давления:

$$Q_L = \frac{\pi \cdot R_L^4 \cdot n \cdot (P_H - P_s) \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot \operatorname{sh} \left[ 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot (L - x) \right]}{2 \cdot \mu \cdot \operatorname{ch} \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot L \right)} \quad (5)$$

Из представленной формулы следует, что расход снижается до нуля при  $x=L$  и равен нулю при отсутствии перепада давлений. Данная формула может быть упрощена при использовании для определения проницаемости мембраны по экспериментальным данным. В этом случае контролируемым параметром является скорость потока жидкости на входном патрубке мембраны ( $x=0$ ).

В этом случае формула приобретает вид:

$$Q_L = \frac{\pi \cdot R_L^4 \cdot n \cdot (P_H - P_s) \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot \operatorname{sh} \left[ 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot L_m \right]}{2 \cdot \mu \cdot \operatorname{ch} \left( 4 \cdot \sqrt{\frac{r_p}{R_L^3}} \cdot L_m \right)} \quad (6)$$

Уравнение относительно параметра  $r_p$  является трансцендентным и может быть решено численно. Поэтому, имея экспериментальные данные по расходу воды в единицу времени, определили значение проницаемости керамической мембраны при «тупиковой» фильтрации воды, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Определение проницаемости керамической мембраны

Характеристики работы мембраны	P, атм	Значение
Расход ч/з мембрану, л/час	1	3,06
Коэффициент проницаемости, м		$7,429 \cdot 10^{-13}$
Расход ч/з мембрану, л/час	0,75	2,72
Коэффициент проницаемости, м		$7,436 \cdot 10^{-13}$
Расход ч/з мембрану, л/час	0,55	2,16
Коэффициент проницаемости, м		$7,436 \cdot 10^{-13}$

Как видно из представленных данных при различных давлениях значение проницаемости практически постоянно и не зависит от избыточного давления в эксперименте.

В результате проведения численного моделирования установлено, что с ростом проницаемости керамической мембраны растет доля липидов в получаемой микроэмульсии. При регулируемом перепаде давлений водяного контура внутри мембраны с проницаемостью  $r_p=7,4 \times 10^{-13}$  м (в пределах от 6 атм на входе до 5,99 атм на выходе) и регулируемом перепаде давлений в картридже (в пределах от 1,02 атм на входе до 1,00 атм на выходе), доля масла в водяной фазе составила от 2,60% до 6,15%.

Данные, полученные на установке, обобщены в виде поверхностной диаграммы (Рисунок 1).

Таким образом, изучено влияние перепада давлений и проницаемости мембраны на долю липидов. В дальнейшем исследовали влияние тех же параметров на размер капель, учитывая, что проницаемость и размер пор связаны между собой следующим соотношением:

$$\frac{Q_L \text{ при } p_1}{Q_L \text{ при } p_2} = \frac{D_{p1}^4}{D_{p2}^4} \quad (7)$$

Также определили влияние проницаемости мембраны на размер капель. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 2. Как видно из представленных данных, величина капель зависит от перепада давлений в модуле и проницаемости мембраны. При этом с ростом проницаемости размер капель в эмульсии увеличивается.

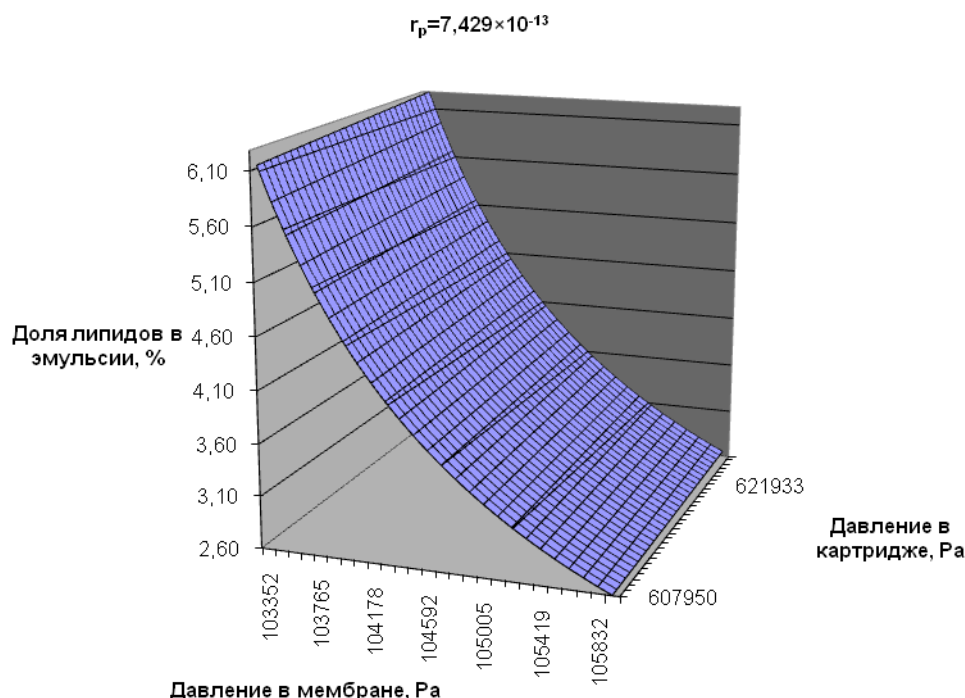


Рис. 1. Доля липидов в эмульсии в зависимости от режимов работы установки (проницаемость мембраны  $r_p=7,429 \times 10^{-13}$  м).

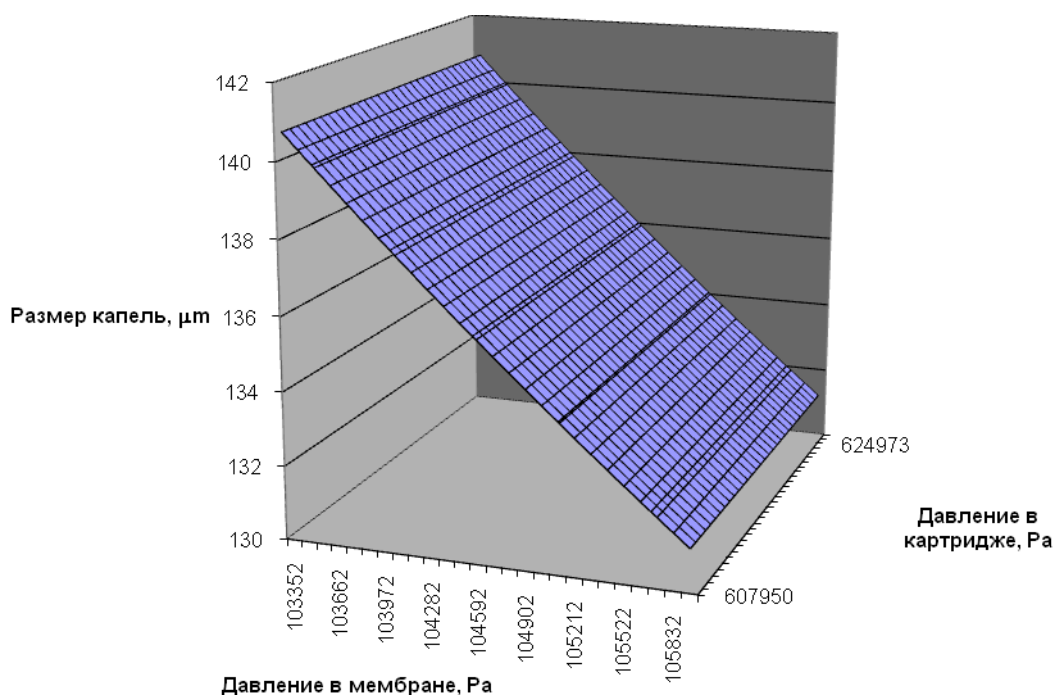


Рис. 2. Размер капель в зависимости от режимов работы мембранной установки (проницаемость мембраны  $\gamma_p=7,429 \times 10^{-13}$  м).

### Вывод

Определены проницаемость керамической трубчатой мембраны и в зависимости от режимов работы установки определены доля липидов в эмульсии и размер получаемых капель.

### Список литературы

1. Charcosset C. Preparation of emulsions and particles by membrane emulsification for the food processing industry. Review. Journal of Food Engineering, 2009, 92: 241-249.
2. Labecki, M., Bowen, B.D., Piret, J.M.,. Two-dimensional analysis of protein transport in the extracapillary space of hollow-fibre bioreactors. Chemical Engineering Science, 1996, 51 (17), 4197-4213.
3. Дёч Г., Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. М.: Изд. «Наука» ГРФМЛ, 1971. 288 с.
4. Cakl, J., Hruby, M., Jirankova, H., Dolecek, P. Combined membrane processes: Comparing of dead-end and cross-flow modes. 17<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering 27-31 August 2006. Prague, Czech Republic.