

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ БЕЛКОВО-УГЛЕВОДНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ

Дейниченко Г.В., д-р техн. наук, профессор,  
Мазняк З.А., канд. техн. наук, доцент,  
Гузенко В.В., канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
Харьковский государственный университет питания  
и торговли, г. Харьков

*Рассматриваются вопросы относительно математического моделирования процесса мембранного концентрирования белково-углеводного молочного сырья. Приведены результаты исследований влияния основных параметров процесса мембранной обработки белково-углеводного молочного сырья на производительность ультрафильтрационных мембран. Определены рациональные параметры проведения процесса ультрафильтрационного концентрирования белково-углеводного молочного сырья в режиме барботирования.*

*The questions regarding the mathematical modeling of the membrane concentration process of albumen-carbohydrate of the milk row material are considered. The research results of the influence of basic parameters of the membrane process of albumen-carbohydrate of the milk row material on the ultrafiltration membranes productivity are described. The rational parameters of the process conduction of the ultrafiltration concentration of albumen-carbohydrate of the milk row material in condition of bubbling device are determined.*

Ключевые слова: моделирование, молочное сырье, ультрафильтрация, концентрирование, мембрана.

**Постановка проблемы в общем виде.** В настоящее время в пищевой промышленности мембранные методы применяют для очистки и концентрирования фруктовых и овощных соков в консервном производстве, диффузионного сока в сахарном производстве, для концентрирования молока и молочных продуктов, стабилизации безалкогольных напитков и виноградных вин, холодной пастеризации пива, для подготовки технологической воды, очистки растительных масел, получения белка из картофельного сока, разделения крови убойных животных, выделения ферментов, очистки промышленных стоков, разделения газов и т.д. [1–6].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Из всех баромембранных процессов для обработки белково-углеводного молочного сырья (БУМС) в наибольшей степени подходит ультрафильтрация (УФ). Процессу УФ присущи такие преимущества, как высокая экономичность, низкая энергоёмкость, отсутствие фазовых превращений белка. В отличие от обратного осмоса и нанофильтрации процесс УФ протекает при гораздо более низком давлении и в то же время обеспечивает намного более высокую селективность, чем МФ. Одновременно с концентрацией пищевых растворов УФ осуществляет их очистку от низкомолекулярных веществ, бактерий, сохраняя постоянное значение рН. Всё вышеизложенное обусловило широкое использование процесса ультрафильтрации при переработке молочного сырья, однако отсутствие сведений о технических характеристиках современных мембран вызывает необходимость проведения исследований процесса УФ белково-углеводного молочных сырья [7; 8].

**Цель статьи.** Математическое моделирование мембранного концентрирования белково-углеводного молочного сырья с целью определения рациональных параметров процесса.

**Изложение основного материала исследования.** С целью определения характеристик процесса УФ-концентрирования БУМС нами была использована математическая модель по методу планирования эксперимента [9]. Уравнения регрессии получены путем исследования изменения параметров УФ-концентрирование БУМС, обеспечивает изучение процессов, которые проходят во время УФ молочного сырья, а также определение оптимальных условий УФ-концентрирование БУМС для получения их концентратов с разным значением производительности УФ-мембран типа ПАН.

Для исследования процесса мембранного разделения БУМС нами было выбрано следующие основные входные параметры процесса:  $t$  – температура УФ-концентрирования, °С;  $\tau$  – продолжительность процесса УФ-концентрирования, с<sup>2</sup>;  $P$  – давление фильтрации, МПа;  $n$  – частота барботирования, мин<sup>-1</sup>;  $P_1$  – давление барботирования, МПа.

Для выбранных параметров установлены уровни и интервалы варьирования (табл. 1).

Таблиця 1 – Уровни и интервалы варьирования

Условия проведения эксперимента	Обозначения	Параметры влияния				
		t, °C	τ, ч	P, МПа	P <sub>1</sub> , МПа	n, мин <sup>-1</sup>
Основной уровень	X <sub>0</sub>	45	2	0,35	0,56	0,125
Интервал варьирования	ΔX	25	2	0,15	0,04	0,125
Верхний уровень	X1	70	4	0,5	0,6	0,25
Нижний уровень	X2	20	0,25	0,2	0,52	0

В результате проведенных регрессионного и корреляционного анализа совокупности влияния всех трех факторов на продуктивность полупроницаемых УФ-мембран типа ПАН выявлено вид этих зависимостей, которые представлены ниже.

Для процесса УФ-концентрирования БУМС в процессе барботирования:

продуктивность мембраны ПАН-50 для пахты:

$$G1_n^6 = -138,588 + 0,11t + 32,768 P + 99,803 P_1 + 17,583 n + 8 \cdot 10^{-5} t^2 - 55,556 P^2 - 406,25 P_1^2 - 7,668 n^2 + 0,013 t \cdot P - 0,152t \cdot P_1 + 0,032t \cdot n + 25,365P \cdot P_1 - 5,353P \cdot n - 20,073P_1 \cdot n; \quad (1)$$

продуктивность мембраны ПАН-50 для обезжиренного молока:

$$G1_m^6 = -28,972 + 0,125t + 38,556 P + 75,0 P_1 + 12,347 n - 1 \cdot 10^{-3} t^2 - 42,222 P^2 - 62,5 P_1^2 - 28,59 n^2 + 5,39 \cdot 10^{-13} t \cdot P + 1,009 \cdot 10^{-12} t \cdot P_1 + 4,829 \cdot 10^{-13} t \cdot n + 5,426 \cdot 10^{-11} P \cdot P_1 + 8,333 \cdot 10^{-11} P \cdot n + 3,003 \cdot 10^{-10} P_1 \cdot n; \quad (2)$$

продуктивность мембраны ПАН-50 для творожной сыворотки:

$$G1_c^6 = -37,091 + 0,076t + 54,592 P + 99,803 P_1 + 20,526 n - 2,939 \cdot 10^{-4} t^2 - 64,83 P^2 - 82,917 P_1^2 - 39,739 n^2 + 0,017 t \cdot P - 0,023t \cdot P_1 - 1,207 \cdot 10^{-3} t \cdot n + 12,173P \cdot P_1 + 0,201P \cdot n - 4,246P_1 \cdot n; \quad (3)$$

продуктивность мембраны ПАН-100 для пахты:

$$G2_n^6 = -127,391 + 0,076t + 28,309 P + 437,924 P_1 + 17,647 n - 4,667 \cdot 10^{-4} t^2 - 33,185 P^2 - 385,417 P_1^2 - 19,871 n^2 - 2,401 \cdot 10^{-3} t \cdot P - 9,002 \cdot 10^{-3} t \cdot P_1 + 0,021t \cdot n + 9,834P \cdot P_1 - 3,487P \cdot n - 13,078P_1 \cdot n; \quad (4)$$

продуктивность мембраны ПАН-100 для обезжиренного молока:

$$G2_m^6 = -168,099 - 6,431 \cdot 10^{-3} t + 31,366 P + 587,479 P_1 + 27,009 n + 2,133 \cdot 10^{-5} t^2 - 29,407 P^2 - 516,667 P_1^2 - 18,596 n^2 - 0,014 t \cdot P + 0,078t \cdot P_1 - 0,028t \cdot n - 2,508P \cdot P_1 + 4,749P \cdot n - 32,193P_1 \cdot n; \quad (5)$$

продуктивность мембраны ПАН-100 для творожной сыворотки:

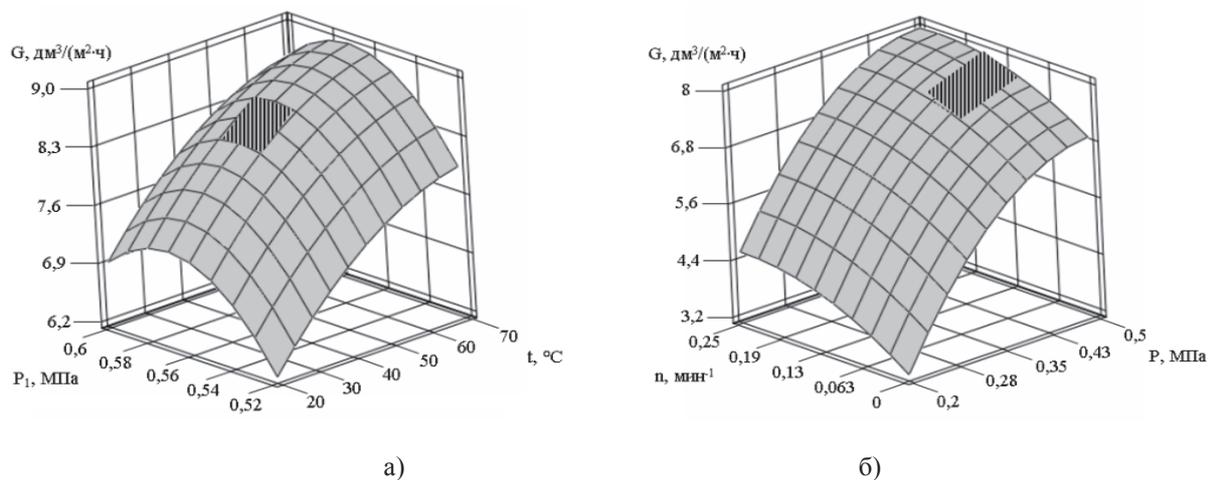
$$G2_c^6 = -36,803 + 0,069t + 42,708 P + 116,559 P_1 + 24,698 n + 3,323 \cdot 10^{-4} t^2 - 53,807 P^2 - 97,917 P_1^2 - 43,482 n^2 + 8,042 \cdot 10^{-3} t \cdot P + 7,158 \cdot 10^{-3} t \cdot P_1 + 0,012t \cdot n + 13,64P \cdot P_1 + 2,016P \cdot n - 12,439P_1 \cdot n; \quad (6)$$

Анализ полученных регрессионных уравнений показал, что значения производительности УФ-мембран типа ПАН, зависит от давления, продолжительности, температуры, частоты и давления. Но основное воздействие оказывают температура, давление и частота барботирования. Причем производительность УФ-мембран увеличивается с повышением температуры процесса УФ-концентрирования БУМС, высоком рабочем давлении и давления барботирования. Существенно влияние на производительность УФ-мембран и продолжительности процесса УФ-концентрирования, а также парное воздействие температуры и продолжительности, температуры и рабочего давления, температуры и давления барботирования, рабочего давления и частоты барботирования процесса ультрафильтрации.

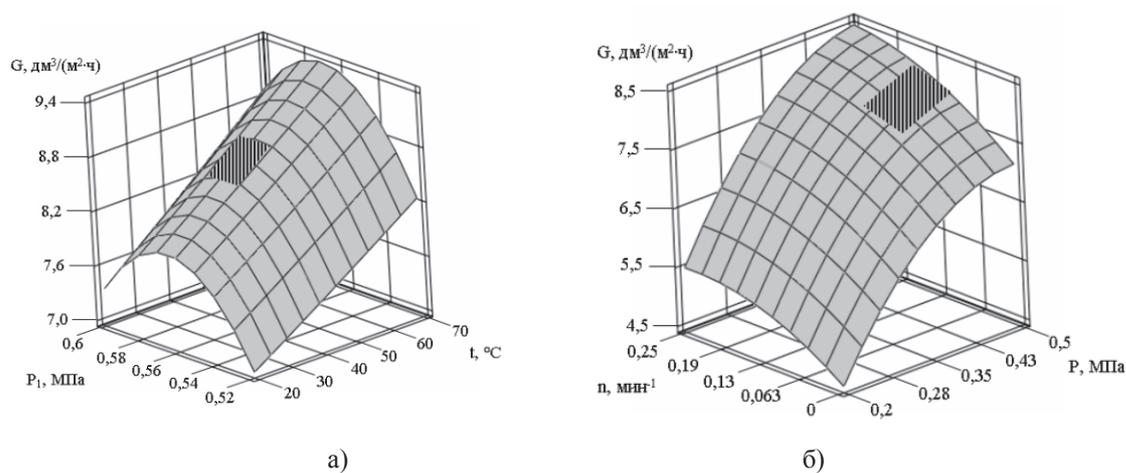
Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных характеристик полученных УФ-концентратов показал хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных по производительности для двух типов мембран.

С помощью созданной нами математической модели были определены условия проведения процесса УФ-концентрирования с использованием двух типов полупроницаемых мембран типа ПАН для обеспечения рациональных показателей продуктивности, а также возможного максимального значения обозначенной характеристики при оптимальных параметрах [10].

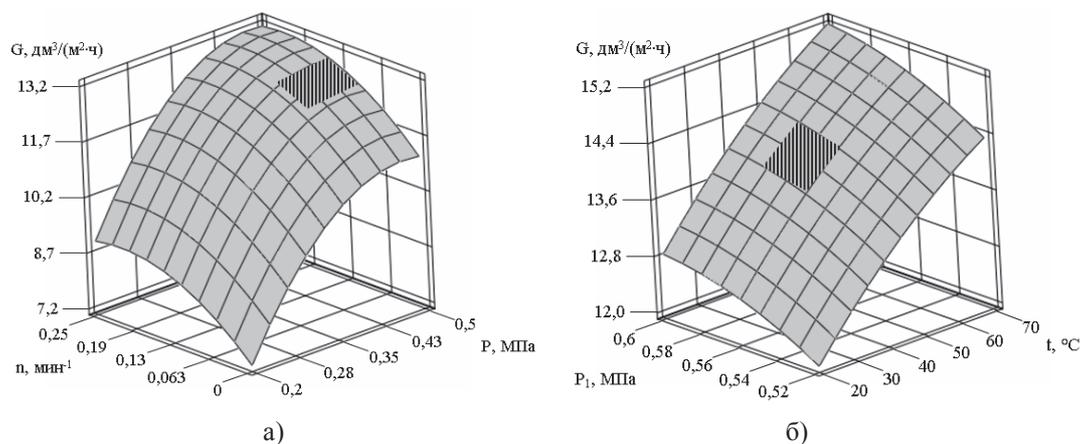
Оптимизация технологических режимов процесса ультрафильтрации исследуемых видов БУМС в тупиковом режиме и в режиме барботирования позволила получить объёмные графические зависимости, которые характеризуют указанные процессы (рис. 1 – 3). Наиболее рациональные режимы проведения процессов ультрафильтрации обозначены на графических зависимостях соответствующей штриховкой.



**Рис. 1 – Зависимость производительности ультрафильтрационной мембраны ПАН-100 в процессе мембранного разделения БУМС от: а) давления барботирования ( $P_1$ ) и температуры ( $t$ ); б) частоты барботирования ( $n$ ) и давления фильтрации ( $P$ )**



**Рис. 2 – Зависимость производительности ультрафильтрационной мембраны ПАН-100 в процессе мембранного разделения обезжиренного молока от: а) давления барботирования ( $P_1$ ) и температуры ( $t$ ); б) частоты барботирования ( $n$ ) и давления фильтрации ( $P$ )**



**Рис. 3 – Зависимость производительности ультрафильтрационной мембраны ПАН-100 в процессе мембранного разделения творожной сыворотки от: а) давления барботирования ( $P_1$ ) и температуры ( $t$ ); б) частоты барботирования ( $n$ ) и давления фильтрации ( $P$ )**

Вышеприведенные зависимости позволили определить рациональные технические параметры процесса УФ обезжиренного молока, пахты и творожной сыворотки в режиме барботирования разделяемых жидких высокомолекулярных полидисперсных систем. Установлено, что наиболее эффективно проводить процесс при температуре 40...50 °С, давлении фильтрации – 0,4...0,5 МПа. Рекомендуемыми режимами барботирования при этом являются частота барботирования 0,10...0,15 мин<sup>-1</sup> и давление барботирования 0,56...0,58 МПа. Указанные конструктивные особенности и технологические режимы позволяют интенсифицировать процесс ультрафильтрационного концентрирования обезжиренного молока по сравнению с УФ в тупиковом режиме в 1,3...1,4 раз, пахты – в 1,5...1,6 раз, творожной сыворотки – в 1,4...1,5 раз.

Экспериментальные исследования показали, что применение режима барботирования позволяет повысить эффективность УФ-разделения белково-углеводного молочного сырья – пахты, обезжиренного молока и творожной сыворотки. Установлено, что в режиме барботирования происходит интенсификация процесса УФ БУМС в сравнении с УФ в тупиковом режиме в 1,5...1,6 раз при ультрафильтрации пахты, в 1,3...1,4 раза при ультрафильтрации обезжиренного молока, в 1,4...1,5 раза при ультрафильтрации творожной сыворотки.

**Выводы.** Из всех существующих баромембранных процессов разделения для концентрирования белково-углеводного молочного сырья в наибольшей степени подходит ультрафильтрация. Ультрафильтрационное концентрирование отличается высокой экономичностью, низкой энергоемкостью, сохраняет нативные свойства компонентов молочного сырья, осуществляет его очистку от низкомолекулярных веществ. Поэтому проведения исследований процесса мембранного концентрирования белково-углеводного молочного сырья является актуальной задачей, что будет способствовать развитию мембранной технологии в предприятиях агропромышленного комплекса нашей страны. Результаты математического моделирования позволили установить рациональные технологические параметры процесса ультрафильтрации белково-углеводного молочного сырья в режиме барботирования. Наиболее эффективно проводить процесс ультрафильтрационного концентрирования при температуре 40...50 °С, давлении фильтрации – 0,4...0,5 МПа, продолжительности процесса – 3,0...4,0 часа. Рекомендуемыми режимами барботирования при этом является частота барботирования 0,10...0,15 мин<sup>-1</sup> и давлении барботирования 0,56...0,58 МПа.

#### Литература

1. Брык М.Т. Мембранная технология в пищевой промышленности / М.Т. Брык, В.Н. Голубев, А.П. Чагаровский – К. : Урожай, 1991. – 224 с.
2. Лысова В.Н. Использование методов мембранной технологии в пищевой промышленности / В.Н. Лысова, Ю.И. Никулин, Е.Е. Иноземцев и др. // Вестник Астраханского государственного технологического университета. – 1996. – № 2. – С. 144–146.
3. Бабёнышев С.П. Мембранные технологии очистки растительного масла / С.П. Бабёнышев, И. А. Евдокимов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 4. – С. 78–80.
4. Гранев И.Н. Мембранные технологии в молочной промышленности / И.Н. Гранев, С.В. Зверев // Молочное дело. – 2005. – № 2. – С. 78–80.
5. Ribeiro A. The optimisation of soybean oil degumming on a pilot plant scale using a ceramic membrane / A. Ribeiro, B. Ning, G. Goncalves // J. Food Eng. – 2008. – V. 87. – № 4. – P. 514–521.
6. Кудрявцев В.А. Ультрафильтрация диффузионного сока сахарной свеклы на мембранном элементе трубчатого типа / В.А. Кудрявцев, В.В. Спичак, П.А. Ананьева и др. // Сахар. – 2008. – № 1. – С. 33–35.
7. Мазняк З.О. Дослідження процесу ультрафільтраційного концентрування скотин та його апаратурне оформлення : дис. ... кандидата техн. наук : 05.18.12 / Мазняк Захар Олександрович. – Х., 2003. – 660 с.
8. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии / А.А. Свитцов. – М. : ДеЛи-принт, 2007. – 280 с.
9. Дьяконов В. П. Справочник по MathCAD PLUS 6.0 PRO / В. П. Дьяконов. – М. : СК Пресс, 1997. – 336 с.
10. Дейниченко Г.В. Рациональні параметри мембранної обробки білково-вуглеводної молочної сировини / Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, О.В. Гафуров, О.О. Підкорчевний // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць. – Х. : ХДУХТ, 2013. – Вип. 1 (17). – С. 141–147.