

*subsystems: the apple identification subsystem and the automatic tracking subsystem of moving objects. The automatic apple identification subsystem provides for the preliminary processing of personnel, the allocation of points of the accompanied objects. The results of this stage are preliminary processing of the image from video sensors, improving the quality of the original image, while the criterion for image quality is selected in accordance with the purpose of the system (improving the visual characteristics of the image, identifying some features of the image). The automatic tracking subsystem provides for tracking the video stream, preprocessing video frames, and highlighting moving apples. The results of this stage are obtaining the characteristics of the movement (the trajectory of movement, the coordinates of the apples, the angle of mismatch between the apples and the optical region of the video sensor). It was found that the accuracy and speed of the system is ensured by automatic operations: identification, localization, tracking of apples, as well as determining the moment of the appearance of a moving object in the field of sorting and issuing a signal to the actuator to determine the desired apples from the general flow, which made it possible to obtain at the current time many apples selected according to a given criterion with known position coordinates on the conveyor line.*

**Key words:** video signal, conveyor line, apple sorting process, automated control, apple tracking system, SCADA tools.

DOI : 10.33274/2079-4827-2019 -39-2-48-54

УДК 542.816

*Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, професор<sup>1</sup>*

*Гузенко В. В., канд. техн. наук<sup>1</sup>*

*Омельченко О. В., канд. техн. наук<sup>2</sup>*

*Абрамова О. В., магістрант<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків, Україна, e-mail: oborud.hduht@gmail.com

<sup>2</sup> Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: omelchenko@donnuet.edu.ua

#### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ КОНЦЕНТРУВАННЯ НЕЖИРНОЇ МОЛОЧНОЇ СИРОВИНИ**

UDK 542.816

*Deynichenko G. V., Grand PhD in Engineering sciences, Professor<sup>1</sup>*

*Guzenko V. V., PhD in Engineering sciences<sup>1</sup>*

*Omelchenko O. V., PhD in Engineering sciences<sup>2</sup>*

*Abramova O. V., Master's Degree<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Kharkiv State University of Food Technology and Trade (Kharkiv, Ukraine), e-mail: oborud.hduht@gmail.com

<sup>2</sup> Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky (Kryvyi Rih, Ukraine), e-mail: omelchenko@donnuet.edu.ua

#### **MATHEMATICAL MODELING OF MEMBRANE PROCESSES OF CONCENTRATION OF LOW-FAT DAIRY RAW MATERIALS**

**Мета** — створення математичної моделі для визначення продуктивності напівпроникних полімерних мембран під час концентрування нежирної молочної сировини та визначення основних технологічних параметрів процесу мембранного розділення харчових високомолекулярних рідин.

Надійшла до редакції 02.11.2019 р. © Г. В. Дейниченко, В. В. Гузенко, О. В. Омельченко, О. В. Абрамова, 2019

**Методи.** Запропоновано до використання нову математичну модель для визначення технологічних параметрів процесу ультрафільтраційного концентрування нежирної молочної сировини в режимі барботування.

**Результати.** Складено математичну модель процесу концентрування нежирної молочної сировини. Подано ґрунтовний опис наведеної моделі для визначення продуктивності ультрафільтраційних мембран під час мембранного оброблення нежирної молочної сировини. Досліджено продуктивність напівпроникних мембран типу ПАН та побудовано залежності згідно із запропонованою методикою моделювання процесу концентрування нежирної молочної сировини. Надано опис одержаних залежностей та визначені технологічні параметри процесу мембранного концентрування нежирної молочної сировини в режимі турбулізації процесу розділення. Встановлено, що ефективніше проходження процесу мембранного концентрування відбувається за температури 40...50 °С, тиску фільтрації — 0,4...0,5 МПа. Рекомендованими режимами барботування при цьому є частота барботування 0,10...0,15 хв<sup>-1</sup> і тиск барботування 0,56...0,58 МПа. Встановлено, що в режимі барботування порівняно з ультрафільтрацією в тупиковому режимі відбувається інтенсифікація процесу ультрафільтрації нежирної молочної сировини: в 1,5...1,6 разів за ультрафільтрації сколотин, у 1,3...1,4 разів за ультрафільтрації знежиреного молока, в 1,4...1,5 разів за ультрафільтрації сироватки з-під кислого сиру. Отримані результати спрямовані на подальші дослідження щодо визначення продуктивності інших напівпроникних мембран, що дозволить застосовувати одержані результати для подальшого визначення технологічних параметрів під час застосування засобів інтенсифікації процесу мембранного концентрування біологічних речовин.

**Ключові слова:** модель, молоко, ультрафільтрація, концентрування, мембрана.

**Постановка проблеми.** Сьогодні в харчовій промисловості мембранні методи застосовують для очищення і концентрування фруктових і овочевих соків у консервному виробництві, дифузійного соку в цукровому виробництві, для концентрування молока і молочних продуктів, стабілізації безалкогольних напоїв і виноградних вин, холодної пастеризації пива, для підготовки технологічної води, очищення рослинних масел, отримання білка з картопляного соку, розділення крові забійних тварин, виділення ферментів, очищення промислових стоків, поділу газів тощо [1–5].

Попри те, що процеси мембранного оброблення успішно використовуються в різних галузях харчової промисловості під час виробництва кулінарної та кондитерської продукції нині технічне забезпечення процесу мембранного концентрування для перероблення нежирної молочної сировини (НМС) викликає деякі складнощі [6, 7]. При цьому спостерігається відсутність вдосконалених мембранних установок малої продуктивності, що пояснюється недостатньою кількістю експериментальних даних, необхідних для розрахунку процесу мембранного концентрування та устаткування для його реалізації [8, 9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З усіх мембранних процесів для оброблення НМС найбільшою мірою підходить ультрафільтрація (УФ). Процес УФ має такі переваги: висока економічність, низька енергоємність, відсутність фазових перетворень білка. На відміну від зворотного осмосу і нанофільтрації процес УФ протікає за більш низького тиску й одночасно забезпечує більш високу селективність, ніж мікрофільтрація. Одночасно з концентрацією харчових розчинів УФ здійснює їх очищення від низькомолекулярних речовин, бактерій, зберігаючи постійне значення рН. Вищевикладене зумовлює широке використання процесу ультрафільтрації під час перероблення молочної сировини, проте відсутність відомостей про технічні характеристики сучасних мембран викликає необхідність проведення досліджень процесу УФ нежирної молочної сировини [10, 11].

**Мета статті** — математичне моделювання мембранного концентрування нежирної молочної сировини з метою визначення раціональних параметрів процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

— надати опис запропонованої математичної моделі для визначення технологічних параметрів процесу концентрування НМС з урахуванням методів інтенсифікації (барботування);

— дослідити продуктивність напівпроникних мембран типу ПАН та побудувати залежності згідно із запропонованою методикою моделювання процесу концентрування НМС;

— визначити раціональні значення технологічних параметрів процесу концентрування НМС.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** З метою визначення характеристик процесу УФ-концентрування НМС було використано математичну модель за методом планування експерименту [12]. Рівняння регресії, отримані шляхом дослідження зміни параметрів УФ-концентрування нежирної молочної сировини, забезпечують вивчення явищ, які проходять під час УФ молочної сировини, а також визначення оптимальних умов УФ-концентрування НМС для отримання їх концентратів з різним значенням продуктивності УФ-мембран типу ПАН.

Для дослідження процесу мембранного розділення НМС було обрано такі основні вхідні параметри процесу:  $t$  — температура УФ-концентрування, °С;  $\tau$  — тривалість процесу УФ-концентрування, год;  $P$  — тиск фільтрації, МПа;  $n$  — частота барботування, хв<sup>-1</sup>;  $P_1$  — тиск барботування, МПа.

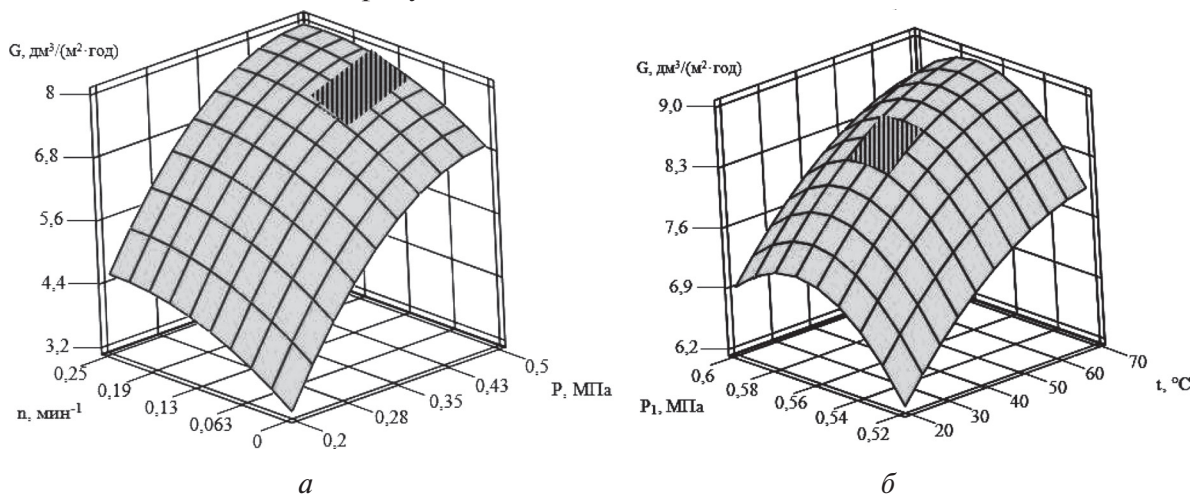
Для обраних параметрів встановлені рівні та інтервали варіювання (табл. 1) [13].

**Таблиця 1** — Рівні та інтервали варіювання

Умови проведення експерименту	Позначення	Параметри впливу				
		$t$ , °С	$\tau$ , год	$P$ , МПа	$P_1$ , МПа	$n$ , хв <sup>-1</sup>
Основний рівень	$X_0$	45	2	0,35	0,56	0,125
Інтервал варіювання	$\Delta X$	25	2	0,15	0,04	0,125
Верхній рівень	$X_1$	70	4	0,5	0,6	0,25
Нижній рівень	$X_2$	20	0,25	0,2	0,52	0

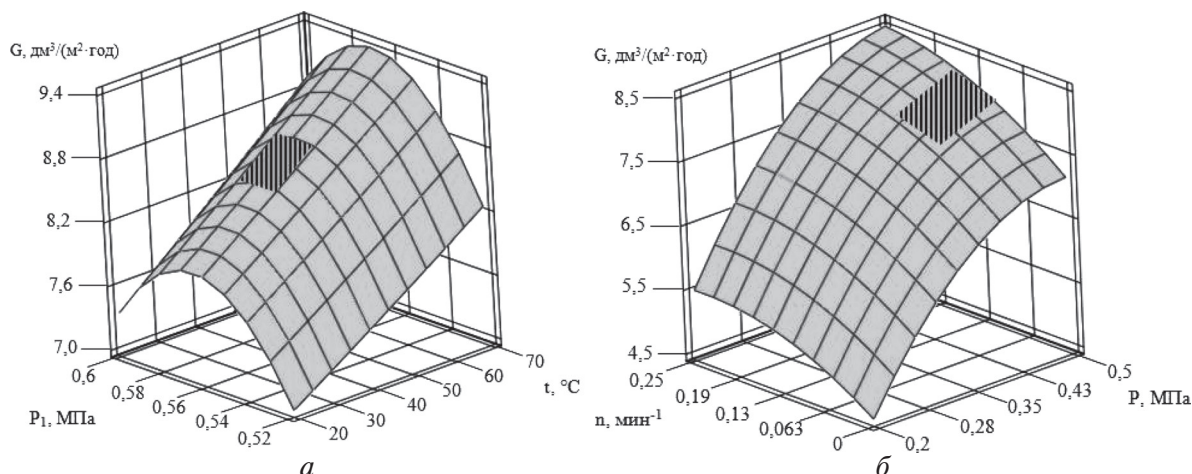
У результаті проведеного регресійного і кореляційного аналізу сукупності впливу всіх трьох факторів на продуктивність напівпроникних УФ-мембран типу ПАН виявлено вид цих залежностей, які наведені нижче.

Оптимізація технологічних режимів процесу УФ-концентрування досліджуваних видів НМС в тупиковому режимі і в режимі барботування дозволила одержати об’ємні графічні залежності, які характеризують зазначений процес (рис. 1–3) [14]. Раціональні технологічні параметри проведення процесу ультрафільтрації позначено на графічних залежностях відповідним штрихуванням.

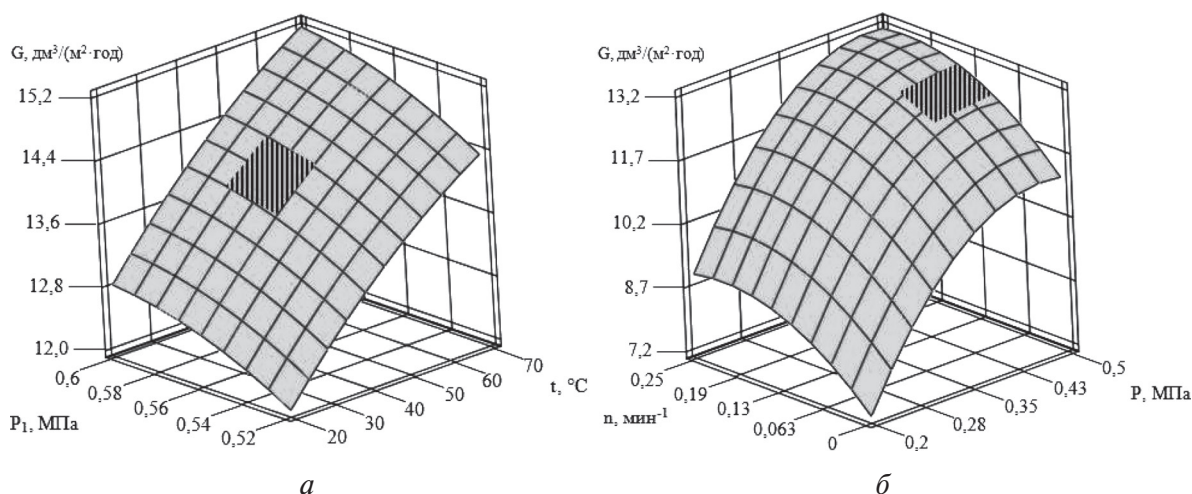


**Рисунок 1** — Залежність продуктивності УФ-мембрани ПАН-100 у процесі мембранного розділення сколотин від: *a* — тиску барботування ( $P_1$ ) і температури ( $t$ ); *б* — частоти барботування ( $n$ ) і тиску фільтрації ( $P$ )





**Рисунок 2** — Залежність продуктивності УФ-мембрани ПАН-100 у процесі мембранного розділення знежиреного молока від: *a* — тиску барботування ( $P_1$ ) і температури ( $t$ ); *б* — частоти барботування ( $n$ ) і тиску фільтрації ( $P$ )



**Рисунок 3** — Залежність продуктивності УФ-мембрани ПАН-100 у процесі мембранного розділення сироватки з-під кислого сиру від: *a* — тиску барботування ( $P_1$ ) і температури ( $t$ ); *б* — частоти барботування ( $n$ ) і тиску фільтрації ( $P$ )

Для процесу УФ-концентрування НМС під час барботування:

— продуктивність мембрани ПАН-50 для сколотин:

$$G1_{\text{ск}}^6 = -138,588 + 0,11t + 32,768 P + 99,803 P_1 + 17,583 n + 8 \cdot 10^{-5} t^2 - \\ - 55,556 P^2 - 406,25 P_1^2 - 7,668 n^2 + 0,013 t P - 0,152t P_1 + 0,032t n + \\ + 25,365 P \cdot P_1 - 5,353 P \cdot n - 20,073 P_1 \cdot n;$$

— продуктивність мембрани ПАН-50 для знежиреного молока:

$$G1_{\text{мол}}^6 = -28,972 + 0,125t + 38,556 P + 75,0 P_1 + 12,347 n - 1 \cdot 10^{-3} t^2 - \\ - 42,222 P^2 - 62,5 P_1^2 - 28,59 n^2 + 5,39 \cdot 10^{-13} t P + 1,009 \cdot 10^{-12} t P_1 + \\ + 4,829 \cdot 10^{-13} t n + 5,426 \cdot 10^{-11} P \cdot P_1 + 8,333 \cdot 10^{-11} P \cdot n + 3,003 \cdot 10^{-10} P_1 \cdot n;$$

— продуктивність мембрани ПАН-50 для сироватки з-під кислого сиру:

$$G1_{\text{сир}}^6 = -37,091 + 0,076t + 54,592 P + 99,803 P_1 + 20,526 n - 2,939 \cdot 10^{-4} t^2 - \\ - 64,83 P^2 - 82,917 P_1^2 - 39,739 n^2 + 0,017 t P - 0,023t P_1 - 1,207 \cdot 10^{-3} t n + \\ + 12,173 P \cdot P_1 + 0,201 P \cdot n - 4,246 P_1 \cdot n;$$

— продуктивність мембрани ПАН-100 для сколотин:

$$G2_{\text{ск}}^6 = -127,391 + 0,076t + 28,309 P + 437,924 P_1 + 17,647 n - 4,667 \cdot 10^{-4} t^2 - \\ - 33,185 P^2 - 385,417 P_1^2 - 19,871 n^2 - 2,401 \cdot 10^{-3} t P - 9,002 \cdot 10^{-3} t P_1 + \\ + 0,021t n + 9,834 P \cdot P_1 - 3,487 P \cdot n - 13,078 P_1 \cdot n;$$

— продуктивність мембрани ПАН-100 для знежиреного молока::

$$G2_{\text{мол}}^6 = -168,099 - 6,431 \cdot 10^{-3} t + 31,366 P + 587,479 P_1 + 27,009 n + \\ + 2,133 \cdot 10^{-5} t^2 - 29,407 P^2 - 516,667 P_1^2 - 18,596 n^2 - 0,014 t P + \\ + 0,078 t P_1 - 0,028 t n - 2,508 P \cdot P_1 + 4,749 P \cdot n - 32,193 P_1 \cdot n;$$

— продуктивність мембрани ПАН-50 для сироватки з-під кислого сиру:

$$G2_{\text{сир}}^6 = -36,803 + 0,069 t + 42,708 P + 116,559 P_1 + 24,698 n + \\ + 3,323 \cdot 10^{-4} t^2 - 53,807 P^2 - 97,917 P_1^2 - 43,482 n^2 + 8,042 \cdot 10^{-3} t P + \\ + 7,158 \cdot 10^{-3} t P_1 + 0,012 t n + 13,64 P \cdot P_1 + 2,016 P \cdot n - 12,439 P_1 \cdot n.$$

Вищенаведені залежності дозволили визначити раціональні технічні параметри процесу УФ знежиреного молока, сколотин і сироватки з-під кислого сиру в режимі барботування рідких високомолекулярних полідисперсних систем, які були сконцентровані мембранним розділенням. Встановлено, що ефективніше проходження процесу мембранного концентрування відбувається за температури 40...50 °С, тиску фільтрації — 0,4...0,5 МПа. Рекомендованими режимами барботування при цьому є частота барботування 0,10...0,15 хв<sup>-1</sup> та тиск барботування 0,56...0,58 МПа. Експериментальні дослідження показали, що застосування режиму барботування дає можливість підвищити ефективність УФ-розділення нежирної молочної сировини.

Встановлено, що в режимі барботування відбувається інтенсифікація процесу УФ НМС порівняно з УФ в тупиковому режимі в 1,5...1,6 разів за ультрафільтрації сколотин, у 1,3...1,4 разів за ультрафільтрації знежиреного молока, у 1,4...1,5 разів за ультрафільтрації сироватки з-під кислого сиру.

**Висновки.** З усіх існуючих мембранних процесів розділення для концентрування білково-вуглеводної молочної сировини більшою мірою підходить ультрафільтрація. Ультрафільтраційне концентрування відрізняється високою економічністю, низькою енергоємністю, зберігає нативні властивості компонентів молочної сировини, здійснює його очищення від низькомолекулярних речовин. Тому проведення досліджень процесу мембранного концентрування нежирної молочної сировини є актуальним завданням, що сприятиме розвитку мембранної технології в підприємствах агропромислового комплексу нашої країни. Результати математичного моделювання дали змогу встановити раціональні технологічні параметри процесу ультрафільтрації нежирної молочної сировини в режимі барботування. Найефективніше проводити процес ультрафільтраційного концентрування за температури 40...50 °С, тиску фільтрації — 0,4...0,5 МПа, тривалості процесу — 3,0...4,0 год. Рекомендованими режимами барботування при цьому є частота барботування 0,10...0,15 хв<sup>-1</sup> і тиску барботування 0,56...0,58 МПа.

У наступних дослідженнях за даним напрямом планується проведення досліджень для визначення технологічних параметрів процесу мембранного оброблення інших високомолекулярних харчових рідин рослинного і тваринного походження.

### Список літератури / References

1. Deinychenko, G., Maznyak, Z., Zolotukhina, I., Gafurov, O. (2011). Membrane concentration of non-fat milk stuff. *Industrial Engineering Journal «RECET»*, no. 3, pp. 245–248.
2. Дейниченко Г. В., Мазняк З. О., Золотухіна І. В. Ультрафільтраційні процеси та технології раціональної переробки білково-вуглеводної молочної сировини: [монографія]. Х. : Факт, 2008. 208 с.
3. Dejnichenko, G. V., Maznyak, Z. O., Zolotuhina, I. V. (2008). *Ultrafiltratsiini protsesy ta tekhnolohii ratsionalnoi pererobky bilkovo-vuhlevodnoi molochnoi syrovyny*: [Multifiltering processes and technology rational processing of Ultrafiltration Protein-Carbohydrate Raw Milk]. Kharkiv, Fakt Publ., 208 p.
3. Kelly, P. (2011). Milk Protein Concentrate. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, no. 4, pp. 39–44.
4. Ding U., Kleinschmidt T., Lorenz C. (2014). Alterations to the composition of casein micelles and retentate serum during ultrafiltration of skim milk at 10 and 40 °C. *International Dairy Journal*, no. 1, pp. 63–69.

5. Deinychenko, G., Mazniak, Z., Kramarenko, D., Guzenko, V. (2015). Determination of ultrafiltration membranes shrinkage factor. *Ukrainian Food Journal*, no. 4., pp. 328–334.
6. Akoum, O., Jaffrin, M., Ding, L. (2005). Concentration of total milk proteins by high shear ultrafiltration in a vibrating membrane module. *Journal of Membrane Science*, no. 247, iss. 1–2, pp. 211–220.
7. СВИТЦОВ А. А. Введение в мембранную технологию. М.: Дели принт, 2007. 208 с.  
Svitcov, A. A. (2007). *Vvedenie v membrannuju tehnologiju* [Introduction to membrane technology]. Moscow, Deli print Publ., 208 p.
8. Бабёнышев С. П., Евдокимов И. А. Мембранные технологии очистки растительного масла. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2008. № 4. С. 78–80.  
Babyonyishev, S. (2008). *Membrannyye tehnologii ochistki rastitelnogo masla* [Membrane technologies for the purification of vegetable oil]. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials], no. 4, pp. 78–80.
9. Гранев И. Н., Зверев С. В. Мембранные технологии в молочной промышленности. *Молочное дело*. 2005. № 2. С. 78–80.  
Granev, I. N., Zverev, S. V. (2005). *Membrannyye tehnologii v molochnoy promyshlennosti* [Membrane technology in the dairy industry]. *Molochnoe delo* [Dairy business], no. 2, pp. 78–80.
10. Ribeiro, A., Ning, B., Goncalves, G. (2008). The optimisation of soybean oil degumming on a pilot plant scale using a ceramic membrane. *J. Food Eng.*, no. 4, pp. 514–521.
11. Богомолов В. Ю., Лазарев С. И. Промышленная переработка вторичного молочного сырья. *Вопросы современной науки и практики*. 2014. № 1 (50). С. 82–91.  
Bogomolov, V., Lazarev, S. (2014). *Promyshlennaya pererabotka vtorichnogo molochnogo syrya* [Industrial processing of secondary dairy raw materials]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki* [Questions of modern science and practice], no. 1 (50), pp. 82–91.
12. Lobasenko, B. A., Semenov, A. G. (2013). Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. *Foods and Raw Materials*. no. 1, pp. 74–81.
13. Дейниченко Г. В., Мазняк З. О., Гафуров О. В., Підкорчевний О. О. Рациональні параметри мембранної обробки білково-вуглеводної молочної сировини. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць*. 2013. Вип. 1 (17). С. 141–147.  
Deinychenko, G., Mazniak, Z., Gafurov, O., Pidkorchevniy, O. (2013). *Ratsionalni parametry membrannoi obrobky bilkovo-vuhlevodnoi molochnoi syrovyny*. [Rational parameters of membrane processing of protein-carbohydrate milk raw materials]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli* [Progressive food technology and technology in the restaurant industry and trade], no. 17, pp. 141–147.
14. Дьяконов В. П. Справочник по MathCAD PLUS 6.0 PRO. М. : СК Пресс, 1997. 336 с.  
Dyakonov, V. (1997). *Spravochnik po MathCAD PLUS 6.0 PRO* [MathCAD PLUS 6.0 PD Reference]. Moscow, CC Press, 336 p.

**Цель** — создание математической модели для определения продуктивности полупроницаемых полимерных мембран во время концентрирования нежирного молочного сырья и определения основных технологических параметров процесса мембранного разделения пищевых высокомолекулярных жидкостей.

**Методы.** Предложена к использованию новая математическая модель для определения технологических параметров процесса ультрафильтрационного концентрирования нежирного молочного сырья в режиме барботирования.

**Результаты.** Составлена математическая модель процесса концентрирования нежирного молочного сырья. Представлено обоснованное описание приведенной модели для определения производительности ультрафильтрационных мембран при мембранной обработке нежирного молочного сырья. Исследована производительность полупроницаемых мембран типа ПАН и построены зависимости согласно предложенной методике моделирования процесса концентрирования нежирного молочного сырья. Представлено описание полученных зависимостей и определены технологические параметры процесса мембранного концентрирования



нежирного молочного сирья в режиме турбулизации процесса разделения. Установлено, что эффективное прохождение процесса мембранного концентрирования происходит при температуре 40...50 °С, давлении фильтрации — 0,4...0,5 МПа. Рекомендованными режимами барботирования являются частота барботирования 0,10...0,15 мин<sup>-1</sup> и давление барботирования 0,56...0,58 МПа. Установлено, что в режиме барботирования по сравнению с ультрафильтрацией в тупиковом режиме происходит интенсификация процесса ультрафильтрации нежирного молочного сирья: в 1,5...1,6 раза при ультрафильтрации пахты, в 1,3...1,4 раза при ультрафильтрации обезжиренного молока, в 1,4...1,5 раза при ультрафильтрации творожной сыворотки.

Полученные результаты направлены на дальнейшие исследования по определению производительности других полупроницаемых мембран, что позволит применять полученные результаты для дальнейшего определения технологических параметров при применении средств интенсификации процесса мембранного концентрирования биологических веществ.

**Ключевые слова:** модель, молоко, ультрафильтрация, концентрирование, мембрана.

**Objective.** The objective of the article is to create a mathematical model for determining the productivity of semipermeable polymer membranes during the concentration of low-fat milk raw materials and to determine the main technological parameters of the process of membrane separation of food high molecular weight liquids.

**Methods.** A new mathematical model is proposed for use to determine the technological parameters of the process of ultrafiltration concentration of non-fat milk raw materials in the bubbling mode.

**Results.** The mathematical model of the process of concentrating low-fat dairy raw materials has been developed. The justified description of the model for determining the performance of ultrafiltration membranes during membrane processing of low-fat dairy raw materials is presented. The performance of semi-permeable membranes of the PAN type was studied and dependencies were constructed according to the proposed methodology for modeling the process of concentrating low-fat milk. The description of the obtained dependences is presented, and technological parameters of the membrane concentration process of nonfat milk raw materials in the turbulization mode of the separation process are determined.

It was established that the effective passage of the membrane concentration process occurs at a temperature of 40–50 °С, a filtration pressure of 0.4...0.5 МПа. Recommended bubbling regimes are a bubbling frequency of 0.10–0.15 min<sup>-1</sup> and a bubbling pressure of 0.56...0.58 МПа. It has been established that in the bubbling mode, compared to ultrafiltration in a dead-end mode, the process of ultrafiltration of nonfat milk raw materials is intensified: 1.5...1.6 times with ultrafiltration of buttermilk, 1.3...1.4 times with ultrafiltration of skim milk, 1.4...1.5 times with ultrafiltration of curd whey.

The results are aimed at further studies to determine the performance of other semi-permeable membranes, which will allow the results to be used to further determine the technological parameters when using means of intensifying the process of membrane concentration of biological substances.

**Keywords:** model, milk, ultrafiltration, concentration, membrane.