





Анализ экспериментальных данных по кинетическим характеристикам очистки молочной сыворотки на ультрафильтрационных элементах типа БТУ 05/2

Дмитрий А. Родионов	¹	dimok-407@mail.ru	 0000-0001-6686-2007
Сергей И. Лазарев	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0002-427-9587
Константин К. Полянский	²	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0003-0617-3271
Елена В. Эккерт	³	pachena@mail.ru	
Дмитрий Л. Полушкин	¹	satyr_dee@mail.ru	 0000-0003-3738-1946

¹ Тамбовский Государственный Технический Университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия





² Воронежский филиал РЭУ им. Г. В. Плеханова, г. Воронеж, 394000, Россия

³ ООО «Векша», проезд Пограничный, д. 2, г. Тамбов, 392027, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных данных по кинетическим характеристикам ультрафильтрационных трубчатых элементов, такие как выходной удельный поток, коэффициент задержания, коэффициент диффузионной проницаемости, коэффициент распределения. Для исследований очистки молочной сыворотки применялись ультрафильтры трубчатого типа БТУ 05/2 с материалом мембран фторопласт (Ф), полиэфирсульфон (ПЭСФ), полисульфон (ПС). Для теоретического расчета коэффициента задержания, выходного удельного потока, коэффициента диффузионной проницаемости, коэффициента распределения были разработаны математические выражения и получены эмпирические коэффициенты. Разработанное математическое выражение с хорошей достоверностью описывает экспериментальные данные. Полученные экспериментальные и расчетные данные могут быть с высокой надежностью использованы при расчете массопереносных потоков веществ через полупроницаемую мембрану, а также в инженерных методах расчета и прогнозирования эффективности, применения мембранных процессов для концентрирования сыворотки. Концентрация белка в реальной молочной сыворотке определялась методом формольного титрования. На основе проведенных исследований была установлена зависимость роста выходного удельного потока от давления, что оптимальным давлением для концентрирования молочной сыворотки на выбранных нами ультрафильтрационных мембранах является 0,25 МПа. Для трех типов ультрафильтров экспериментальное значение коэффициента находилось в пределах 99% по белку. Для теоретического расчета коэффициента задержания была разработана и зарегистрирована программа на языке MAXIMA. За счет метода нанесения мембраны на армирующий элемент, материал мембраны полиэфирсульфон (ПЭСФ) и полисульфон (ПС) имеют подложку, за счет чего они сорбируют на себе больше веществ, из-за этого коэффициент диффузионной проницаемости и коэффициент распределения значительно выше, чем у фильтрующего элемента с мембраной из фторопласта (Ф), которая не имеет подложки.

Ключевые слова: мембрана, концентрирование, молочная сыворотка, коэффициент задержания, удельный поток, коэффициент распределения, математическая модель

Analysis of experimental data on the kinetic characteristics of milk whey purification using ultrafiltration elements of BTU 05/2 type

Dmitriy A. Rodionov	¹	dimok-407@mail.ru	 0000-0001-6686-2007
Sergei I. Lazarev	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0002-427-9587
Konstantin K. Polyansky	²	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0003-0617-3271
Elena V. Eckert	³	pachena@mail.ru	
Dmitriy L. Polushkin	¹	satyr_dee@mail.ru	 0000-0003-3738-1946

¹ Tambov State Technical University, Sovetskaya., 106 Tambov, 392000, Russia

² Voronezh branch of REU named after G.V. Plekhanov, st. Karl Marx, 67A, Voronezh, 394000, Russia

³ LLC "Veksha", Tambov, Pogranichny passage, 2, Tambov, 392000, Russia

Abstract. The paper presents the results of experimental data on the kinetic characteristics of ultrafiltration tubular elements, such as the output specific flow, retention coefficient, diffusion permeability coefficient, distribution coefficient. To study the purification of milk whey, we used tubular ultrafilters BTU 05/2 with membrane material fluoroplast (F), polyethersulfone (PESF), polysulfone (PS). For theoretical calculation of the retention coefficient, output specific flux, diffusion permeability coefficient, distribution coefficient, mathematical expressions were developed and empirical coefficients were obtained. The developed mathematical expression describes the experimental data with good reliability. The obtained experimental and calculated data can be used with high reliability in calculating mass-transfer fluxes of substances through a semi-permeable membrane, as well as in engineering methods for calculating and predicting efficiency, and using membrane processes for concentrating serum. The protein concentration in real milk whey was determined by formol titration. On the basis of the studies carried out, the dependence of the growth of the output specific flow on pressure was established, that the optimal pressure for concentrating milk whey on the ultrafiltration membranes we have chosen is 0.25 MPa. For three types of ultrafilters, the experimental value of the coefficient was within 99% for protein. For the theoretical calculation of the retention coefficient, a program in the MAXIMA language was developed and registered. Due to the method of applying the membrane to the reinforcing element, the membrane material polyethersulfone (PESF) and polysulfone (PS) have a substrate, due to which they sorb more substances on themselves, because of this, the diffusion permeability coefficient and the distribution coefficient are much higher than that of a filter element with membrane made of fluoroplastic (F), which does not have a substrate.

Keywords: membrane, concentration, whey, retention coefficient, specific flux, distribution coefficient, mathematical model

Для цитирования

Родионов Д.А., Лазарев С.И., Полянский К.К., Эккерт Е.В., Полушкин Д.Л. Анализ экспериментальных данных по кинетическим характеристикам очистки молочной сыворотки на ультрафильтрационных элементах типа БТУ 05/2 // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 88–94. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-88-94

For citation

Rodionov D.A., Lazarev S.I., Polyansky K.K., Eckert E.V., Polushkin D.L. Analysis of experimental data on the kinetic characteristics of milk whey purification using ultrafiltration elements of BTU 05/2 type. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 88–94. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-4-88-94

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В пищевой промышленности для оценки адекватности экспериментальных данных используют различные методы, такие как приближенное описание объекта моделирования, выраженное с помощью математической символики или, например, провести линии тренда. Эти два типа оценки адекватности экспериментальных данных кардинально отличаются друг от друга, так как математические модели построены на физическом смысле и могут достоверно прогнозировать тот или иной процесс, а, в свою очередь, применение линий тренда построено на приближении и не дает реальной картины происходящего процесса.

Для описания производительности от давления авторы [1] использовали линейную зависимость, при этом результаты экспериментальных данных не расходятся с законами мембранного разделения. В качестве математического описания производительности по пермеата от времени эксперимента использовалась вероятно степенная функция.

В работе [2] авторы оценивают влияние электродиализной обработки на количество термофильных аэробных и факультативных анаэробных микроорганизмов для достоверности экспериментальных данных они используют линии тренда, так, например, для творожной сыворотки использовалась логарифмическая функция, а $R^2=1$, что является очень хорошим показателем, в свою очередь, для описания результата эксперимента для подсырной сыворотки и пермеата обезжиренного молока используют полином второго порядка с высокой долей сходимости, где ошибка менее 5%.

В своих исследованиях авторы [3] получили экспериментальные данные по закономерностям концентрирования творожной сыворотки методом нанофильтрации, авторами были получены следующие зависимости, скорости фильтрации от фактора объемного сжатия, а также скорость фильтрации от длительности процесса нанофильтрации, для описания всех точек экспериментальных данных они применяют полиномиальную функцию второго рода.

В работе [4] авторы исследуют процесс восстановления сухой молочной сыворотки методами ультразвуковой кавитации и электрохимической обработкой воды. Для описания зависимости pH от процентного содержания сухой молочной сыворотки используется степенная функция с процентом ошибки менее 5%.

Нейтрализация молочной сыворотки после электродиализа (ЭД) обычно осуществляется путем прямого добавления NaOH или раствора KOH.

Однако добавление этих растворов приводит к увеличению общего содержания твердых частиц и золы в сыворотке. В работе [5] был исследован электродиализ с биполярной мембраной (EDBM) для нейтрализации опресненной сыворотки после ЭД. Для описания вольтамперных характеристик используется уравнение второго порядка.

Авторами [6] были проведены пилотные исследования по концентрированию молочной сыворотки методами прямого осмоса. Для определения характеристик мембраны использовался поток с разных сторон мембраны с давлением 0,05-0,28 бар и описывалось прямой зависимостью.

Определение механизмов загрязнения и точное количественное прогнозирование поведения нанопористой мембраны представляют большой интерес в мембранных процессах. Работа [7] была сосредоточена на всестороннем сравнении двух классических и новых моделей загрязнения. Для описания экспериментальных данных по полной блокировке пор применялись линии тренда с значением R^2 от 0,37 до 0,99.

В последние десятилетия важность ультрафильтрации сыворотки как «зеленого» метода возросла. Однако, поскольку засорение является важным недостатком, исследователи сосредоточили свое внимание на его предсказании с помощью математических моделей. В этой работе [8] были использованы три ультрафильтрационные мембраны с разными порогами молекулярной массы и материалами. Используется для ультрафильтрации модельных растворов сыворотки с различной концентрацией белка. В качестве новинки была рассмотрена модель устойчивости к закупориванию пор, которая учитывает временную эволюцию устойчивости к закупориванию.

Исследования [9] посвящены теории и практике ультрафильтрации творожной сыворотки и обезжиренного молока. Основное внимание уделяется основным рабочим параметрам задействованного оборудования и максимально допустимому значению содержания сухих веществ молока. Эксперимент включал сыворотку, полученную как побочный продукт переработки творога, и обезжиренное молоко, полученное сепарированием цельного молока. Мембранный метод переработки вторичного молочного сырья позволяет вести экологически чистое безотходное производство. Для описания влияния трансмембранного давления на объем пермеата использовалась логарифмическая функция.

Из проведенного литературного обзора [1–9] стоит отметить, что авторы для описания экспериментальных данных используют линии тренда, которые показывают высокую сходимость полученных экспериментальных данных.

Полученные таким образом уравнения не позволяют прогнозировать результаты экспериментов так как они строятся исключительно на численных значениях. В свою очередь, использование математических моделей позволяет прогнозировать процессы, так как в основе математической модели применяются физические законы, а также результаты экспериментальных данных. Целью данной работы является получить выражения для теоретического расчета коэффициентов задержания, выходного удельного потока, диффузии сорбции для ультрафильтрационных мембран в среде молочной сыворотки.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выступали трубчатые ультрафильтры типа БТУ 05/2 с материалом мембран фторопласт(Ф), полисульфон (ПС), полиэфирсульфон (ПЭСФ) производства ЗАО НТЦ «Владипор» [10]. Для экспериментов использовалась реальная молочная сыворотка с молокоперерабатывающего предприятия Тамбовской области.

Выходной удельный поток – это параметр, указывающий на производительность мембраны, а именно на то, какой объем раствора прошел через площадь мембраны за определенный промежуток времени. Входной удельный поток рассчитывается по формуле:

$$J = \frac{V}{F_m \tau}, \quad (1)$$

где V – объем пермеата, м³; F_m – рабочая площадь мембраны, м²; τ – время проведения экспериментальных исследований, с.

Данные исследования проходили на установке трубчатого типа, общий вид и принцип работы которой описаны в работе [11]. Диапазон изменения давления был в пределах от 0,1 МПа до 0,25 МПа.

Для теоретического описания выходного удельного потока использовалось выражение:

$$J = K(\Delta P - \Delta \pi), \quad (2)$$

где K – коэффициент водопроницаемости мембраны, м/(Па·с); ΔP – перепад давления на мембране, Па; $\Delta \pi$ – перепад осмотического давления в растворах по обе стороны мембраны, Па.

На основе формулы (2), с учетом полученных зависимостей удельной производительности от давления и концентрации растворов было получено следующее выражение:

$$J = K \cdot (\Delta P - k_1 \cdot C) \cdot \exp(k_2 \cdot C^{k_3}) \cdot \exp\left(\frac{k_4}{T}\right), \quad (3)$$

где K – коэффициент водопроницаемости мембраны; T – температура разделяемого раствора, К; C – концентрация растворенного вещества в растворе, кг/м³; k_i – эмпирические коэффициенты.

Коэффициент задержания является основным параметром, характеризующим качество процесса разделения. Он зависит от материала мембраны, природы растворенных веществ и их концентраций в растворе, от рабочего давления, температуры и гидродинамики процесса. Для расчета коэффициента задержания использовалось следующее выражение:

$$k = \left(1 - \frac{C_{pem}}{C_{исх}}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

где k – коэффициент задержания, %; C_{pem} – концентрация растворенного вещества в ретентате, кг/м³; $C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м³.

Концентрация массовой доли белка определялась методом формольного титрования по ГОСТ 25179–2014 Молоко и молочные продукты [12].

Для расчета теоретического значения коэффициента задержания использовалось модифицированное выражение (5) Б.В. Дерягина и др.:

$$k = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_p k_1} - 1\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{J k_p k_2}{D}\right)\right] \exp(-J k_3)}, \quad (5)$$

где k_p – коэффициент распределения мембран; D – коэффициент диффузии, м²/с; k_1, k_2, k_3 – эмпирические коэффициенты.

Для определения непосредственно коэффициента диффузии D , м²/с использовали выражение:

$$D = \frac{P_\partial}{k_p}, \quad (6)$$

где P_∂ – коэффициент диффузионной проницаемости, м²/с.

В исследовании свойств мембран в среде подсырной сыворотки большое значение имеют диффузионные свойства мембран по отношению к отдельным компонентам сыворотки. Сущность эксперимента заключалась в переносе вещества сквозь мембрану за счет разности концентраций раствора, а именно молочной сыворотки и дистиллированной воды. Более подробное описание процесса диффузионной проницаемости, а также лабораторной установки представлены в работе [13].

После проведенных экспериментов коэффициент диффузионной проницаемости рассчитывался по формуле:

$$P_\partial = \frac{C_2 V_2 \delta}{(C_1 - C_2) F_m \tau}, \quad (7)$$

Для теоретического расчета коэффициента диффузионной проницаемости P_d ($\text{м}^2/\text{с}$) применялось выражение:

$$P_d = A \exp(B \times C) \left(\frac{T}{T_0} \right)^m, \quad (8)$$

где C – концентрация раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$; T – температура раствора, К ; T_0 – температура окружающей среды, К ; A , B , m – эмпирические коэффициенты.

Для оценки сорбционных свойств ультрафильтрационных мембран использовалась методика, описанная в работе [14].

Для расчета непосредственно коэффициента распределения мембраны использовалось выражение:

$$k_p = \frac{C_m}{C_{\text{исх}}}, \quad (9)$$

где k_p – коэффициент распределения; C_m – равновесная концентрация растворенного вещества в исследуемом образце мембраны, $\text{кг}/\text{м}^3$; $C_{\text{исх}}$ – равновесная концентрация растворенного вещества в исходном исследуемом растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В свою очередь, для аналитического расчета коэффициента распределения использовалось выражение:

$$k_p = \frac{b \times C_{\text{исх}}^n \left(\frac{293}{T} \right)^m}{C_{\text{исх}}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{исх}}$ – концентрация исходного раствора $\text{кг}/\text{м}^3$; T – температура молочной сыворотки, К ; b , n , m – эмпирические коэффициенты.

Результаты и обсуждение

После проведенных исследований и расчета значений экспериментальных и расчетных данных по формулам (1)–(5), для ультрафильтрационных мембранных элементов мы получили следующие зависимости выходного удельного потока от давления и коэффициента задержания от давления, которые представлены на рисунках 1–2 соответственно.

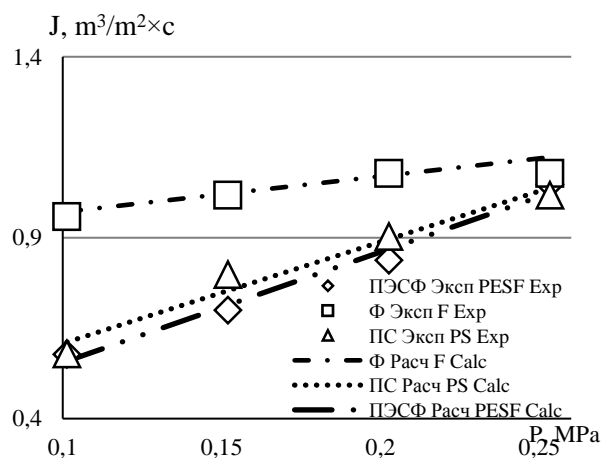


Рисунок 1. Зависимость выходного удельного потока от давления

Figure 1. The dependence of the output specific flow on pressure

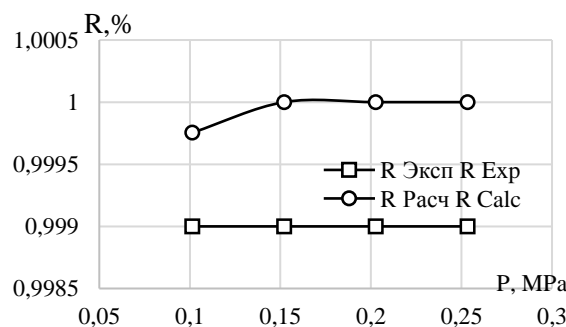


Рисунок 2. Влияние давления на коэффициент задержания

Figure 2. Influence of pressure on retention coefficient

Из рисунка 1, можно сделать вывод что с ростом давления увеличивается производительность мембран, наибольший эффект концентрирования молочной сыворотки наблюдается в пределах 0,25 МПа.

Для формулы (2) были получены следующие эмпирические коэффициенты и представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Эмпирические коэффициенты для теоретического расчета выходного удельного потока для ультрафильтрационных мембран

Table 1.

Empirical coefficients for theoretical calculation of the output specific flux for ultrafiltration membranes

Материал мембраны Membrane material	K_1	K_2	K_3	K_4
Полиэфиросульфон Polyethersulfone	-2,9095	-3,4335	1,425	10,06
Фторопласт Fluoroplastic	-0,9555	-500,36	0,7556	5,53
Полисульфон Polysulfone	-2,23	-334,622	0,953733	6,76

Для трех типов мембран наблюдается очень высокий показатель задержания по белку. Отклонение расчетного значения от эксперимента составляет менее 5%. Для теоретического расчета коэффициента задержания была разработана программа на языке MAXIMA [15].

Эмпирические коэффициенты для уравнения (5) эмпирические коэффициенты представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Эмпирические коэффициенты для коэффициента задержания

Table 2.

Empirical coefficients for the retention coefficient

Материал мембраны Membrane material	K_1	K_2	K_3
Полиэфиросульфон Polyethersulfone	-0,00191	0,000481	-8,28254
Фторопласт Fluoroplastic	987530,5	-0,000457	-10,85
Полисульфон Polysulfone	-0,00013	0,000568	-6,28254

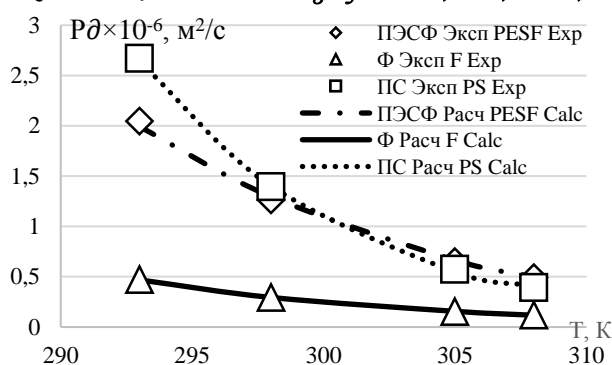


Рисунок 3. Зависимость коэффициента диффузионной проницаемости от температуры

Figure 3. Dependence of the diffusion permeability coefficient on temperature

Таблица 3.

Эмпирические коэффициенты для коэффициента диффузионной проницаемости

Table 3.

Empirical coefficients for the coefficient of diffusion permeability

Материал мембраны Membrane material	$A \cdot 10^{-8}$	B	m
Полиэфирсульфон Polyethersulfone	5,69	8,79	-38,3
Фторопласт Fluoroplastic	8,2	5,78	-27,535
Полисульфон Polysulfone	8,79	7,77	-28,535

Как видно на рисунке 3, что мембраны из полиэфирсульфона и полисульфона имеют коэффициент диффузионной проницаемости значительно выше, чем мембрана из фторопласта, это связано с конструкцией этих мембран, так как мембраны из полиэфирсульфона и полисульфона имеют подложку и часть белка сорбировалась на этой подложке. В свою очередь мембрана из фторопласта не имеет подложки и представляет из себя исключительно полупроницаемую пленку с высоким показателем задержанием белка молочной сыворотки.

Как говорилось ранее что трубчатый элемент с материалом мембраны из фторопласта имеет только полупроницаемую пленку, в отличие от элемента с материалом мембраны из полисульфона и полиэфирсульфона из-за этого количество сорбированного вещества выше, и наблюдается такая картина, представленная на рисунке 4.

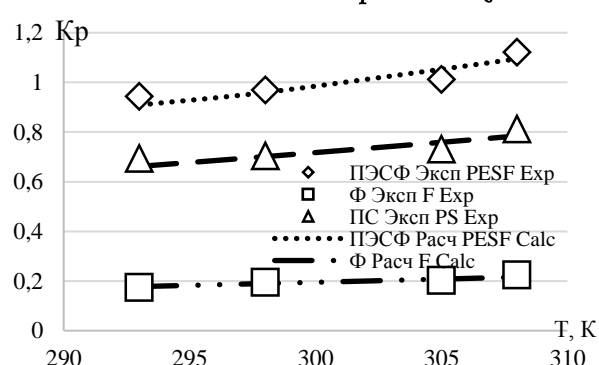


Рисунок 4. Влияние температуры на коэффициент распределения

Figure 4. Influence of temperature on the distribution coefficient

Таблица 4.

Эмпирические коэффициенты для коэффициента распределения мембран

Table 4.

Table 4. Empirical coefficients for the distribution coefficient of membranes

Материал мембраны Membrane material	b	n	m
Полиэфирсульфон Polyethersulfone	0,70199	0,314134	-4,00672
Фторопласт Fluoroplastic	0,917332	5,602172	-3,8924
Полисульфон Polysulfone	1,503226	3,300217	-3,40404

Заключение

В работе проанализированы экспериментальные данные и получены кинетические характеристики ультрафильтрационных трубчатых элементов такие как коэффициент задержания и выходной удельный поток, так же проанализированы результаты по диффузионной проницаемости мембран и коэффициенту распределения. Для всех экспериментов и типов мембран были разработаны математические уравнения, а также подобраны коэффициенты для теоретического расчета, отклонение теоретического значения от экспериментального составляло не более 10%, что является оптимальным показателем для инженерных расчетов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90036. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-38-90036.

Литература

- 1 Михайленко И.Г., Федоренко Б.Н. Концентрирование молочной сыворотки на плоских керамических мембранах // Пищевые ингредиенты и биологически активные добавки в технологиях продуктов питания и парфюмерно-косметических средств. 2019. С. 142–147.
- 2 Анисимов Г.С. и др. Изменение термофильной микрофлоры вторичного молочного сырья в процессе электродиализной обработки // Состояние и перспективы развития наилучших доступных технологий специализированных продуктов питания. 2019. С. 97–101.
- 3 Костюков Д.М. и др. Закономерности концентрирования творожной сыворотки методом нанофильтрации // Молочнохозяйственный вестник. 2012. № 1.


- 4 Лещенко Е.Г., Костенко К.В. Исследование процесса восстановления сухой молочной сыворотки методом ультразвуковой кавитации и электрохимической обработки воды // Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы. 2016. № 4. С. 34–40.
- 5 Merkel A., Ashrafi A.M., Eçer J. Bipolar membrane electrodialysis assisted pH correction of milk whey // Journal of Membrane Science. 2018. V. 555. P. 185–196.
- 6 Chen G.Q. et al. A pilot scale study on the concentration of milk and whey by forward osmosis // Separation and Purification Technology. 2019. V. 215. P. 652–659.
- 7 Torkamanzadeh M. et al. Comparative experimental study on fouling mechanisms in nano-porous membrane: cheese whey ultrafiltration as a case study // Water Science and Technology. 2016. V. 74. № 12. P. 2737–2750.
- 8 Corbatón-Báguena M.J., Álvarez-Blanco S., Vincent-Vela M.C. Evaluation of fouling resistances during the ultrafiltration of whey model solutions // Journal of Cleaner Production. 2018. V. 172. P. 358–367.
- 9 Pavel N. et al. Hydrodynamics and mass transfer with gel formation in a roll type ultrafiltration membrane // Foods and Raw materials. 2018. V. 6. № 2.
- 10 ВЛАДИПОР. URL: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/&cid=010&id=1>
- 11 Родионов Д.А. и др. Ультрафильтрационная установка для концентрирования молочной сыворотки // Сыроделие и маслоделие. 2020. № 1. С. 40–41.
- 12 ГОСТ 25179–2014. Молоко и молочные продукты. Методы определения массовой доли белка. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
- 13 Лазарев С.И. и др. Исследование диффузионной проницаемости белков через ультрафильтрационные мембраны // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1.
- 14 Bogomolov V.Y. et al. Сорбционная способность ультрафильтрационных мембран и потенциал поля поверхностных сил в растворах молочных белков // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 104–110.
- 15 Свидетельство № 2019663815, RU. Расчет эмпирических параметров для коэффициента задержания баромембранного концентрирования подсырной сыворотки / Родионов Д.А., Пчелинцев А.Н., Лазарев С.И., Мищенко С.В. № 2019662437; Заявл. 09.10.2019; Оpubл. 23.10.2019, Бюл. № 11.

References

- 1 Mikhailenko I.G., Fedorenko B.N. Concentration of milk whey on flat ceramic membranes. Food ingredients and biologically active additives in food technologies and perfumery and cosmetics. 2019. pp. 142–147. (in Russian).
- 2 Anisimov G.S. et al. Changes in the thermophilic microflora of secondary milk raw materials in the process of electrodialysis processing. State and prospects for the development of the best available technologies for specialized food. 2019. pp. 97–101. (in Russian).
- 3 Kostyukov D.M. et al. Regularities of concentration of curd whey by nanofiltration. Dairy Bulletin. 2012. no. 1. (in Russian).
- 4 Leshchenko E.G., Kostenko K.V. Investigation of the process of recovery of dry milk whey by the method of ultrasonic cavitation and electrochemical treatment of water. Rational nutrition, food additives and biostimulants. 2016. no. 4. pp. 34–40. (in Russian).
- 5 Merkel A., Ashrafi A. M., Eçer J. Bipolar membrane electrodialysis assisted pH correction of milk whey. Journal of Membrane Science. 2018. vol. 555. pp. 185–196.
- 6 Chen G. Q. et al. A pilot scale study on the concentration of milk and whey by forward osmosis. Separation and Purification Technology. 2019. vol. 215. pp. 652–659.
- 7 Torkamanzadeh M. et al. Comparative experimental study on fouling mechanisms in nano-porous membrane: cheese whey ultrafiltration as a case study. Water Science and Technology. 2016. vol. 74. no. 12. pp. 2737–2750.
- 8 Corbatón-Báguena M.J., Álvarez-Blanco S., Vincent-Vela M.C. Evaluation of fouling resistances during the ultrafiltration of whey model solutions. Journal of Cleaner Production. 2018. vol. 172. pp. 358–367.
- 9 Pavel N. et al. Hydrodynamics and mass transfer with gel formation in a roll type ultrafiltration membrane. Foods and Raw materials. 2018. vol. 6. no. 2.
- 10 VLADIPOR. Available at: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/&cid=010&id=1> (in Russian).
- 11 Rodionov D.A. et al. Ultrafiltration plant for concentrating milk whey. Cheese making and butter making. 2020. no. 1. pp. 40–41. (in Russian).
- 12 GOST 25179–2014. Milk and dairy products. Methods for determining the mass fraction of protein. Moscow, Standartinform, 2015. 16 p. (in Russian).
- 13 Lazarev S.I. et al. Research of diffusion permeability of proteins through ultrafiltration membranes. Proceedings of VSUET. 2019. vol. 81. no. 1. (in Russian).
- 14 Bogomolov V.Y. et al. Sorption capacity of ultrafiltration membranes and the potential of the field of surface forces in solutions of milk proteins. Sorption and chromatographic processes. 2018. vol. 18. no. 1. pp. 104–110. (in Russian).
- 15 Rodionov D.A., Pchelintsev A.N., Lazarev S.I., Mishchenko S.V. Calculation of empirical parameters for the retention coefficient of the baromembrane concentration of cheese whey. Certificate RF, no. 2019663815, 2019.

Сведения об авторах

Дмитрий А. Родионов аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский Государственный Технический, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, dimok-407@mail.ru


 <https://orcid.org/0000-0001-6686-2007>

Information about authors


Dmitriy A. Rodionov graduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya., 106 Tambov, 392000, Russia, dimok-407@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6686-2007>

Сергей И. Лазарев д.т.н., профессор, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский Государственный Технический, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru


 <https://orcid.org/0000-0002-427-9587>

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал РЭУ им. Г.В. Плеханова, г. Воронеж, 394000, Россия, kaf-kit@vfreu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0617-3271>

Елена В. Эккерт главный инженер, ООО «Векша», г. Тамбов, проезд Пограничный, д. 2 392000, Россия, pachena@mail.ru

Дмитрий Л. Полушкин к.т.н., доцент, кафедра материалов и технологий, Тамбовский Государственный Технический, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, satyr_dee@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3738-1946>

Вклад авторов

Дмитрий А. Родионов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Сергей И. Лазарев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат


Константин К. Полянский, Елена В. Эккерт консультация в ходе исследования

Дмитрий Л. Полушкин предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Sergei I. Lazarev Dr. Sci. (Engin.), professor, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, st. Sovetskaya., 106 Tambov, 392000, Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru


 <https://orcid.org/0000-0002-427-9587>

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, commerce and commodity department, Voronezh branch of FSBEI HE REU named after G.V. Plekhanov, Voronezh, st. Karl Marx, 67A, kaf-kit@vfreu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0617-3271>

Elena V. Eckert Chief Engineer, LLC Veksha, Tambov, Pogranchny proezd, 2 392000, Russia., pachena@mail.ru

Dmitriy L. Polushkin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, materials and technology department, Tambov State Technical University, st. Sovetskaya., 106 Tambov, 392000, Russia, satyr_dee@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3738-1946>

Contribution

Dmitriy A. Rodionov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Sergei I. Lazarev wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Konstantin K. Polyansky, Elena V. Eckert consultation during the study

Dmitriy L. Polushkin review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/11/2020	После редакции 27/11/2020	Принята в печать 30/11/2020
Received 18/11/2020	Accepted in revised 27/11/2020	Accepted 30/11/2020