

Разработка аппаратной схемы и программы расчета мембранной установки, укомплектованной аппаратами с отводом поляризационного слоя

Борис А. Лобасенко	¹	lobasenko@mail.ru	 0000-0003-0245-7904
Антон В. Шафрай	¹	shafraia@mail.ru	 0000-0003-4512-1933
Максим В. Просин	¹	prosinmv@yandex.ru	 0000-0002-4615-5628
Андрей Г. Семенов	¹	agsem55@yandex.ru	 0000-0002-3136-3942
Айтбек К. Какимов	²	bibi.53@mail.ru	 0000-0002-9607-1684
Адилбек М. Акимов	²	akimov.adilbek@mail.ru	 0000-0002-9022-1207

¹ Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

² Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20-а, г. Семей, 071412, Республика Казахстан

Аннотация. Рассмотрены различные типы мембранных установок, включающие типовые аппараты с отводом пермеата, которые используются в настоящее время для переработки различных жидких сред. Оцениваются их достоинства и недостатки, условия работы и особенности эксплуатации. Анализируется принцип работы мембранных аппаратов с отводом поляризационного слоя. Отличительной особенностью таких аппаратов является разделение потока исходного сырья на три части: примыкающую к мембране и включающую в себя поляризационный слой с повышенной концентрацией высокомолекулярных веществ (концентрат), обедненное ядро потока, подлежащее повторной обработке (ретентат), и практически не содержащий высокомолекулярных веществ пермеат. Приводится аппаратная схема и принцип работы установки, укомплектованной этим оборудованием. Особенностью этой установки является параллельное расположение мембранных аппаратов. При такой конфигурации установки предусматривается наличие двух контуров циркуляции потока и двух емкостей, в одной из которых будет находиться обедненный поток, в другой ретентат. В процессе работы предусматривается циркуляция обедненного потока. При этом, образующийся поляризационный слой (концентрат), будет отводиться во вторую емкость. Работа продолжается до полной выработки обедненного раствора в емкости. В том случае, когда раствор в этой емкости выработан, а необходимая концентрация продукта не достигнута, в работу включается вторая емкость с концентратом и процесс продолжается. Принцип работы в этом случае аналогичен. Чередуемость емкостей продолжается до получения необходимой степени концентрирования продукта. Предлагается алгоритм расчета, блок-схема и программа расчета продолжительности работы мембранной установки, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. Приведен алгоритм расчета и интерфейс программы. Данная программа позволяет прогнозировать работу таких установок и предусматривает возможность оптимизации их работы.

Ключевые слова: мембранная установка, концентрирование, поляризационный слой, программа расчета, аппаратная схема

Development of a hardware configuration and a calculating program for a membrane plant equipped with polarization layer separation units

Boris A. Lobasenko	¹	lobasenko@mail.ru	 0000-0003-0245-7904
Anton V. Shafraiy	¹	shafraia@mail.ru	 0000-0003-4512-1933
Maxim V. Prosin	¹	prosinmv@yandex.ru	 0000-0002-4615-5628
Andrey G. Semenov	¹	agsem55@yandex.ru	 0000-0002-3136-3942
Aytbek K. Kakimov	²	bibi.53@mail.ru	 0000-0002-9607-1684
Adilbek M. Akimov	²	akimov.adilbek@mail.ru	 0000-0002-9022-1207

¹ Kemerovo State University, Krasnaya St. 6, Kemerovo, 650000, Russia

² Shakarim University, Glinka St., 20-A, Semey, 071412, Kazakhstan

Abstract. Various types of membrane units, including standard units for permeate separating, which are currently used for various liquids processing, are considered. Their advantages and disadvantages, working conditions and operating features are assessed. The principle of operation of membrane units with the bleed of the polarization layer is analyzed. A distinctive feature of such devices is the separation of the feed stream into three parts: adjacent to the membrane, including a polarization layer, with an increased concentration of high molecular substances (HMS) – concentrate, a spent stream core to be re-processed – retentate, and permeate, that practically contains no HMS. The unit scheme and the principle of operation of the plant completed with this equipment are given. A feature of this plant is the parallel arrangement of the membrane devices. In this configuration of the plant, there are two flow circulation loops and two tanks, in one of which there will be a depleted solution, in the other the retentate. During operation, the circulation of the depleted flow is provided. In this case, the resulting polarization layer (concentrate) will be discharged into the second tank. The working process continues until the complete depletion of the solution in the first tank. In the event that the solution in this tank is exhausted, and the required concentration of the product has not been reached, the second tank with the concentrate activates and the process continues. The principle of operation in this case is similar. The rotation of tanks continues until the required degree of concentration of the product is obtained. A calculation algorithm, a block diagram and a program for calculating the operating time of a membrane installation are proposed, for which a certificate of state registration of a computer program has been obtained. The calculation algorithm and program interface are presented. This program makes it possible to predict the operation of such installations and provides for the possibility of optimizing their operation. (Т.п.)

Keywords: membrane installation, concentration, polarization layer, calculation program, instrumental diagram

Для цитирования

Лобасенко Б.А., Шафрай А.В., Просин М.В., Семенов А.Г., Какимов А.К., Акимов А.М. Разработка аппаратной схемы и программы расчета мембранной установки, укомплектованной аппаратами с отводом поляризационного слоя // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 4. С. 37–42. doi:10.20914/2310-1202-2021-4-37-42

For citation

Lobasenko B.A., Shafraiy A.V., Prosin M.V., Semenov A.G., Kakimov A.K., Akimov A.M. Development of a hardware configuration and a calculating program for a membrane plant equipped with polarization layer separation units. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 4. pp. 37–42. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-4-37-42

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

Введение

Актуальной задачей промышленности является разработка нового, более производительного оборудования, которое используется при проектировании установок и аппаратурных схем. Это в полной мере относится к мембранным технологиям переработки молочного сырья, в частности, концентрирования белков молочной сыворотки, ресурсы которой в Российской Федерации составляют порядка 4,6 млн. т в год [1]. Сыворотка является ценным продуктом и содержит значительное количество полезных веществ [2, 3]. Кроме того, мембранные технологии создают предпосылку для получения разнообразных продуктов на малоотходной и безотходной основе.

При создании новых установок и аппаратурных схем в технологиях, в которых они реализуются, целесообразно рассмотреть имеющиеся классификации установок, т. к. они позволяют оценить достигнутый на сегодняшний день уровень техники и прогнозировать её дальнейшее развитие.

При классификации мембранных установок используется несколько признаков [3–6]. К одному из таких признаков относится организация процесса. В этом отношении различают одно- и многоступенчатые установки [7]. Первые, чаще всего, применяются в малотоннажных производствах при небольших объемах перерабатываемых сред. Многоступенчатые установки используются при значительных объемах перерабатываемых сред [3, 8–10].

В комплектацию ступени входит основное и вспомогательное оборудование. К основному можно отнести мембранные аппараты, к вспомогательному – емкости, насосы, трубопроводы и т. д.

Также различают прямоточные и циркуляционные установки [4–6, 11–14]. В первых для получения готового продукта необходимо однократное прохождение раствора через мембранный аппарат (один цикл). В циркуляционных производится полный или частичный возврат обработанного раствора (ретентата [17, 18]) с выхода на вход аппарата. В этом случае различают установки непрерывного действия с частичным возвратом ретентата [14], и порционные установки периодического действия с полным возвратом ретентата [15–16]. Системы с рециркуляцией сырья имеют ряд преимуществ перед прямоточными. Частичная рециркуляция позволяет стабильно поддерживать необходимое давление и скорость движения раствора [14] в непрерывном режиме. Полная рециркуляция дает возможность получать продукт с более высокой концентрацией целевого компонента [16].

Установки комплектуются мембранными аппаратами, в которых производится отвод пермеата (фильтрата [17, 18]) и ретентата (концентрата). Схемы таких установок и принципы их расчета хорошо известны [3, 4, 13].

В последнее время получили развитие конструкции аппаратов с отводом поляризационного слоя, которые позволяют интенсифицировать процесс концентрирования [19]. Отличительной особенностью таких аппаратов является разделение потока исходного сырья на три части: примыкающую к мембране и включающую в себя поляризационный слой с повышенной концентрацией белка (концентрат), обедненное белком ядро потока, подлежащее повторной обработке (ретентат), и практически не содержащий белка пермеат. Это отличает новые аппараты от типовых. Поэтому типовые схемы установок и стандартные методики расчета неприменимы к установкам, использующим другой принцип работы мембранных аппаратов (с отводом поляризационного слоя). В связи с этим, важной задачей является разработка мембранных установок и аппаратурных схем, использующие подобные мембранные аппараты, а также методик их расчета.

Материалы и методы

На основе анализа литературных данных была разработана аппаратурная схема установки с параллельным расположением мембранных аппаратов, производящих отвод поляризационного слоя, которая представлена на рисунке 1.

Перед началом работы все оборудование дезинфицируют, подавая раствор из емкости 11, а затем ополаскивают водой. Заполняют емкость 1 исходным раствором и включают питающий и циркуляционный насосы 7 и 5, обеспечивая подачу раствора в теплообменник 3 и мембранные аппараты 4. Раствор подается одновременно во все аппараты, которые установлены параллельно. В аппаратах раствор разделяется на обедненное ядро (ретентат), более концентрированную пристенную часть, включающую поляризационный слой (концентрат) и пермеат (фильтрат). Ретентат, выходящий из мембранных аппаратов, по трубопроводам снова возвращается в емкость 1, концентрат поступает в емкость 2, пермеат – в емкость 9. Поступающий в аппараты поток ретентата подпитывается из емкости 1 для компенсации убыли части раствора за счет отвода концентрата и пермеата. Циркуляция продолжается до тех пор, пока имеется раствор в емкости 1. Если он заканчивается, а необходимая концентрация не достигнута, производится переключение вентилей таким образом, что на переработку начинает подаваться раствор, находящейся в емкости 2, так что процесс концентрирования

продолжается. Он проходит аналогично описанному выше. При этом ретентат возвращается в емкость 2, а образующийся концентрат накапливается в емкости 1. Таким образом, происходит чередование емкостей до получения необходимой концентрации раствора. Готовый продукт по окончании процесса удаляется из соответствующей емкости. Остатки раствора сливаются

из оборудования, и оно ополаскивается водой. Очистка мембранных элементов производится моющим раствором из емкости 10. После этого осуществляется их ополаскивание водой и дезинфекция из емкости 11 согласно регламенту.

Установка укомплектована мембранными аппаратами, конструкция которых представлена на рисунке 2.

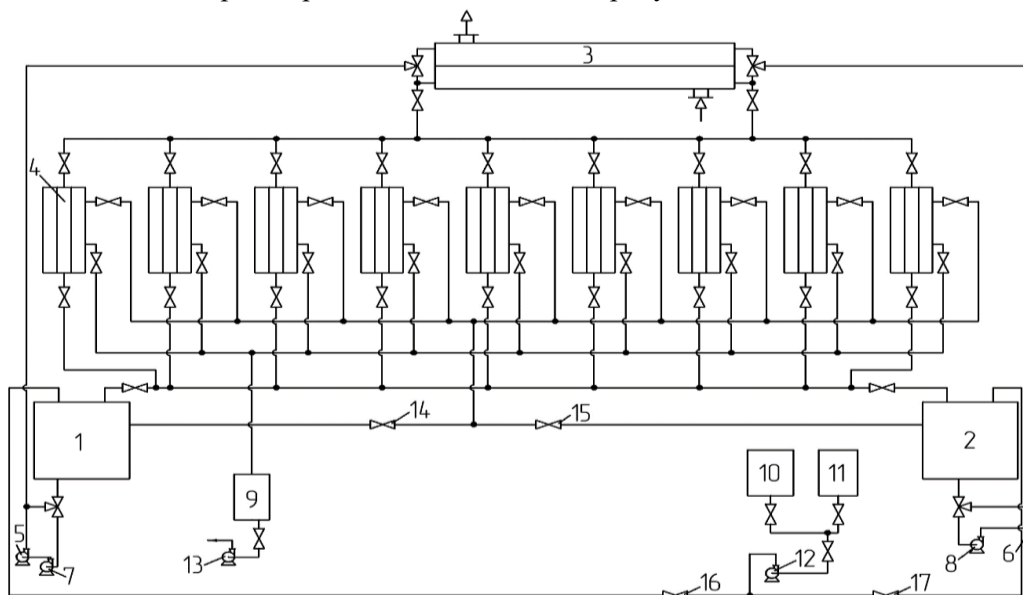


Рисунок 1. Схема мембранной установки, укомплектованной аппаратами с отводом поляризационного слоя: 1,2 – емкости для обрабатываемого раствора и концентрата; 3 – теплообменник; 4 – мембранные аппараты с отводом концентрата; 5, 6, 7, 8, 12, 13 – насосы; 9 – емкость для сбора пермеата; 10, 11 – емкости для моющего и дезинфицирующих растворов; 14, 15, 16, 17 – вентили.

Figure 1. Scheme of membrane plant completed with polarization layer separation units: 1,2 – tanks for workable solution and concentrate; 3 – heat exchanger; 4 – membrane units with concentrate separation; 5, 6, 7, 8, 12, 13 – pumps; 9 – permeate tank; 10, 11 – tanks for washing and disinfectant solutions; 14, 15, 16, 17 – valves

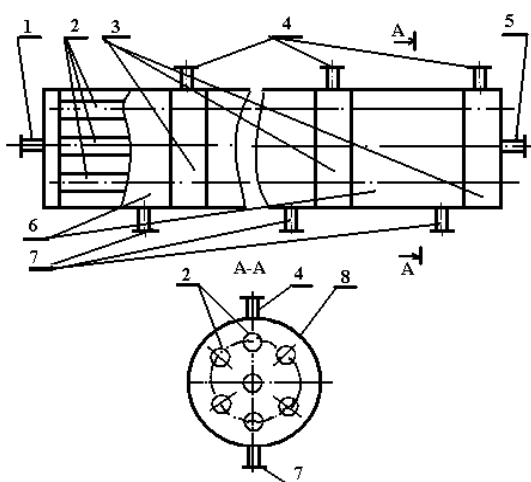


Рисунок 2. Мембранный аппарат: 1, 5 – патрубки для раствора; 2 – трубчатые мембранные элементы; 3 – устройства для отделения концентрата; 4 – патрубки для отвода концентрата; 6 – секции фильтрации; 7 – патрубки для отвода пермеата; 8 – цилиндрический кожух (корпус)

Figure 2. Membrane unit: 1, 5 – solution fittings; 2 – tubular membrane elements; 3 – concentrate separation devices; 4 – concentrate bleeding tubes; 6 – filtration sections; 7 – permeate bleeding tubes; 8 – cylinder case

Предлагаемый аппарат состоит из ряда секций 6 с отводящими устройствами для концентрата 3. Секция состоит из керамических ультрафильтрационных мембран типа КУФЭ-1, расположенных в кожухе 8.

Принцип работы аппарата заключается в следующем. Исходный раствор под давлением поступает через патрубок 1 в аппарат и распределяется по мембранам 2. Проходя вдоль мембран, поток разделяется. Пермеат, содержащий низкомолекулярные соединения, накапливается в корпусе 8, а далее отводится через патрубки 7. Отводящее устройство представляет собой конструкцию, в которой происходит разделение потока раствора на частично обедненный целевым компонентом (белком) ядро и обогащенную пристенную часть (концентрат). Ядро потока попадает в следующую секцию фильтрующих элементов, где работа производится аналогичным образом. На выходе из аппарата обедненный поток (ретентат) отводится через штуцер 5, а поляризационный слой удаляется через штуцер 4. Отводящие устройства могут иметь разную конструкцию [19] и выполняться из

разных материалов, в том числе с использованием технологий 3D-печати [20]

Результаты

Для предложенной аппаратурной схемы был разработан алгоритм и программа расчета [21].

Используя исходные данные, к которым относится объем и концентрация исходного раствора, количество и площадь мембранных элементов, доля отводимого концентрата и проницаемость по пермеату, можно определить продолжительность процесса концентрирования для получения необходимой концентрации раствора.

Интерфейс программы представлен на рисунке 3. Расчет начинается с ввода входных данных, к которым относятся: исходный объем раствора $W_{исх}$ (м³); количество фильтрующих элементов N (шт.); объемный расход раствора через мембранный аппарат V_i (м³/с), который определяется в зависимости от рекомендуемой скорости движения; площадь фильтрации одного мембранного аппарата S (м²); средняя проницаемость по пермеату G_n (м³/(м²·с)); доля отводимого поляризационного слоя (от объемного расхода среды) x .

Рисунок 3. Интерфейс программы

Рисунок 3. Интерфейс программы

Figure 3. Program interface

Далее расчет производится по алгоритму, представленному в блок-схеме на рисунке 4.

На этапе ввода данных инициализируются все переменные, рассчитывается объемный расход среды через все мембранные элементы $V = V_i \times N$, (м³/с). После этого по заданному значению доли отводимого концентрата вычисляется его объемный расход: $V_{пол} = V \times x$, (м³/с).

На этом заканчивается этап инициализации, и программа передает управление основному циклу, начинается итерационная часть работы алгоритма. В начале каждой итерации рассчитывается время переработки исходного объема на текущем этапе работы аппарата: $T_{ци} = W_{исх} / W_i$.

Далее идут вычисления по объемам материальных потоков. Объем пермеата на i -ом цикле, полученный при обработке исходной среды равен $W_{ni} = S G_n \times T_{ци}$. Объем ретентата на i -ом цикле, полученный при обработке исходной среды равен $W_{pi} = V_{пол} \times T_{ци}$. Объем обедненного раствора на i -ом цикле, полученный при обработке исходной среды равен $W_{op} = W_{исх} - W_{ni} - W_{pi}$.

После расчета перечисленных локальных параметров начинается пересчет глобальных переменных. Увеличивается общее время работы аппарата за счет прошедшего цикла: $T_o = T_o + T_{ци}$. Актуализируются общие объемы ретентата и пермеата: $W_p = W_p + W_{pi}$; $W_n = W_n + W_{ni}$. Затем сравнивается объем обедненного раствора W_{op} с объемом ретентата W_p , и если объем обедненного раствора превышает объем ретентата, то цикл продолжается и начинается новая итерация, в которой за исходный объем $W_{исх}$ принимается объем обедненного раствора W_{op} . В противном случае, программа выходит из цикла.

После работы цикла, на экран выводятся итоговые значения объема обедненного раствора W_{op} , объема пермеата W_n , объема ретентата W_p , полученные за все время работы установки. Также выводится общее затраченное время T_o (рисунок 4).

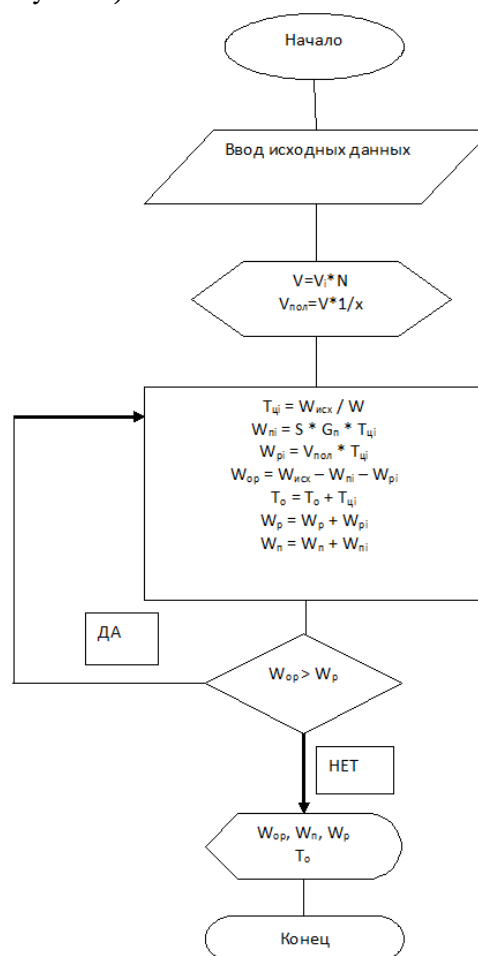


Рисунок 4. Алгоритм расчета

Figure 4. Calculating algorithm

Заключение

Предложена аппаратная схема мембранной установки, укомплектованной аппаратами с отводом поляризационного слоя. Разработана программа расчета продолжительности работы установки при переработке молочной сыворотки. Результаты расчетов, полученных с помощью

разработанной программы, совпадают с данными экспериментальных исследований и укладываются в относительную погрешность 5%. Это дает основания считать, что разработанная программа может быть использована для прогнозирования и оптимизации работы установок такого типа.

Литература

- 1 Рыбалова Т.И. Молочная индустрия России в 2018 г. // Молочная промышленность. 2019. № 1. С. 4–9.
- 2 Храмов А.Г. Феномен молочной сыворотки. СПб.: Профессия, 2011. 804 с.
- 3 Гаврилов Г.Б., Просяков А.Ю., Кравченко Э.Ф., Гаврилов Б.Г. Справочник по переработке молочной сыворотки. Технологии, процессы и аппараты, мембранное оборудование СПб.: Профессия, 2015. 176 с.
- 4 Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. М.: ДеЛи Принт, 2007. 280 с.
- 5 Baker R.W. Membrane Technology and Applications. Chichester: John Wiley&Sons, 2012. 575 p. doi: 10.1002/9781118359686
- 6 Drioli E., Giorno L. Encyclopedia of Membranes. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 2089 p. doi: 10.1007/978-3-662-44324-8
- 7 Meena S., Singh A.K., Panjagari N.R., Arora S. Milk protein concentrates: opportunities and challenges // Journal of Food Science and Technology. 2017. V. 54. P. 3010–3024. doi: 10.1007/s13197-017-2796-0
- 8 Тимкин В.А., Новопашина Л.А. Производство безлактозного молока многоступенчатой диафильтрацией // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2019. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prizvodstvo-bezlaktoznogo-moloka-mnogostupenchatoy-diafiltratsiy>
- 9 Quezada C., Estay H., Cassano A., Troncoso E. et al. Prediction of Permeate Flux in Ultrafiltration Processes: A Review of Modeling Approaches // Membranes. 2021. V. 11. № 5. P.368. doi: 10.3390/membranes11050368
- 10 Nelson B.K., Barbano D.M. A Microfiltration Process to Maximize Removal of Serum Proteins from Skim Milk Before Cheese Making // Journal of Dairy Science. 2005. V. 88. № 5. P. 1891–1900. doi: 10.3168/jds. S0022-0302(05)72865-4
- 11 Ochando-Pulido J.M. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on RO purification of olive mill wastewater // Desalination. 2014. V. 343. P.169–179. doi: 10.1016/j.desal.2014.03.025
- 12 Kappel C., Kemperman A.J.B., Temmink H., Zwijnenburg A. et al. Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment // Journal of Membrane Science. 2014. V. 453. P. 359–368. doi: 10.1016/j.memsci.2013.11.023.
- 13 Кочаров Р.Г., Каграманов Г.Г. Расчет установок мембранного разделения жидких смесей. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 188 с.
- 14 Hammam A.R.A., Martínez-Montegudo S.I., Metzger L.E. Progress in micellar casein concentrate: Production and applications // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. V. 20. № 5. P. 4426–4449. doi: 10.1111/1541-4337.12795.
- 15 Boukil A., Suwal S., Chamberland J, Pouliot Y. et al. Ultrafiltration performance and recovery of bioactive peptides after fractionation of tryptic hydrolysate generated from pressure-treated β -lactoglobulin. // Journal of Membrane Science. 2018. V. 556. P. 42–53. doi: 10.1016/j.memsci.2018.03.079.
- 16 Ohanessian K., Monnot M., Moulin Ph., Ferrasse J.-H. et al. Dead-end and crossflow ultrafiltration process modelling: Application on chemical mechanical polishing wastewaters. // Chemical Engineering Research and Design. 2020. V. 158. P. 164–176. doi: 10.1016/j.cherd.2020.04.007
- 17 Международная терминология по мембранам и мембранным процессам. Химические наука и образование в России. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/2/iupac.htm>
- 18 Терминология. Мембраны и мембранные технологии. URL: <http://www.memtech.ru/index.php/ru/glavnaya/terms>
- 19 Лобасенко Б.А., Семенов А.Г., Захаров Ю.Н. Ультрафильтрация: Теория и практика. Новосибирск: Наука, 2015. 204 с.
- 20 Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. // Procedia Manufacturing. 2019. V. 35. P. 1286–1296. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- 21 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612856. Программа для расчета продолжительности работы мембранной установки на основе аппаратов с отводом поляризационного слоя / Шафрай А.В., Лобасенко Б.А.

References

- 1 Rybalova T.I. Dairy industry in Russia in 2018. Dairy industry. 2019. no. 1. pp. 4–9. (in Russian).
- 2 Khramtsov A.G. Whey phenomenon. SPb, Professiya, 2011. 804 p. (in Russian).
- 3 Gavrilov G.B., Prosekov A.Yu., Kravchenko E.F., Gavrilov B.G. Whey Processing Handbook. Technologies, processes and devices, membrane equipment SPb, Professiya, 2015. 176 p. (in Russian).
- 4 Svitsov A.A. Introduction to membrane technology. Moscow, DeLi Print, 2007. 280 p. (in Russian).
- 5 Baker R.W. Membrane Technology and Applications. Chichester: John Wiley&Sons, 2012. 575 p. doi: 10.1002/9781118359686
- 6 Drioli E., Giorno L. Encyclopedia of Membranes. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 2089 p. doi: 10.1007/978-3-662-44324-8
- 7 Meena S., Singh A.K., Panjagari N.R., Arora S. Milk protein concentrates: opportunities and challenges. Journal of Food Science and Technology. 2017. vol. 54. pp. 3010–3024. doi: 10.1007/s13197-017-2796-0
- 8 Timkin V.A., Novopashina L.A. Production of lactose-free milk by multistage diafiltration // Scientific and technical bulletin: Technical systems in the agro-industrial complex. 2019. no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prizvodstvo-bezlaktoznogo-moloka-mnogostupenchatoy-diafiltratsiy> (in Russian).
- 9 Quezada C., Estay H., Cassano A., Troncoso E. et al. Prediction of Permeate Flux in Ultrafiltration Processes: A Review of Modeling Approaches. Membranes. 2021. vol. 11. no. 5. pp.368. doi: 10.3390/membranes11050368

- 10 Nelson B.K., Barbano D.M. A Microfiltration Process to Maximize Removal of Serum Proteins from Skim Milk Before Cheese Making. *Journal of Dairy Science*. 2005. vol. 88. no. 5. pp. 1891–1900. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72865-4
- 11 Ochando-Pulido J.M. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on RO purification of olive mill wastewater. *Desalination*. 2014. vol. 343. pp.169–179. doi: 10.1016/j.desal.2014.03.025
- 12 Kappel C., Kemperman A.J.B., Temmink H., Zwijnenburg A. et al. Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2014. vol. 453. pp. 359–368. doi: 10.1016/j.memsci.2013.11.023.
- 13 Kocharov R.G., Kagramanov G.G. Calculation of installations for membrane separation of liquid mixtures. Moscow, RKHTU im. DI. Mendeleev, 2007. 188 p. (in Russian).
- 14 Hammam A.R.A., Martínez-Monteagudo S.I., Metzger L.E. Progress in micellar casein concentrate: Production and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 4426–4449. doi: 10.1111/1541-4337.12795.
- 15 Boukil A., Suwal S., Chamberland J., Pouliot Y. et al. Ultrafiltration performance and recovery of bioactive peptides after fractionation of tryptic hydrolysate generated from pressure-treated β -lactoglobulin. *Journal of Membrane Science*. 2018. vol. 556. pp. 42–53. doi: 10.1016/j.memsci.2018.03.079.
- 16 Ohanessian K., Monnot M., Moulin Ph., Ferrasse J.-H. et al. Dead-end and crossflow ultrafiltration process modelling: Application on chemical mechanical polishing wastewaters. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. vol. 158. pp. 164–176. doi: 10.1016/j.cherd.2020.04.007
- 17 International terminology for membranes and membrane processes. *Chemical science and education in Russia*. Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/2/iupac.htm> (in Russian).
- 18 Terminology. Membranes and membrane technologies. Available at: <http://www.memtech.ru/index.php/ru/glavnaya/terms> (in Russian).
- 19 Lobasenko B.A., Semenov A.G., Zakharov Yu.N. Ultrafiltration: Theory and Practice. Novosibirsk: Nauka, 2015. 204 p. (in Russian).
- 20 Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019. vol. 35. pp. 1286–1296. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- 21 Certificate of state registration of a computer program No. 2019612856. A program for calculating the operating time of a membrane installation based on devices with a polarization layer extraction / Shafraev A.V., Lobasenko B.A.

Сведения об авторах

Борис А. Лобасенко д.т.н., профессор, кафедра промышленного дизайна, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово 650000, Россия, lobasenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>

Антон В. Шафрай к.т.н., доцент, кафедра промышленного дизайна, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово 650000, Россия, shafraia@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4512-1933>

Максим В. Просин к.т.н., доцент, кафедра техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово 650000, Россия, prosinmv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Андрей Г. Семенов д.т.н., кафедра общей математики и информатики, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово 650000, Россия, agsem55@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>

Айтбек К. Какимов д.т.н., профессор, кафедра автоматики и информационных технологий, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20-А, 071412, Семей, Казахстан, bibi.53@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9607-1684>

Адилбек М. Акимов докторант, магистр, кафедра технологического оборудования и машиностроения, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20-А, 071412, Семей, Казахстан, akimov.adilbek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9022-1207>

Вклад авторов

Борис А. Лобасенко сформулировал принципы исследования, предложил математическую постановку задачи

Антон В. Шафрай разработал компьютерную программу, выполнил расчёты

Максим В. Просин, Айтбек К. Какимов, Адилбек М. Акимов консультация в ходе исследования

Андрей Г. Семенов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Boris A. Lobasenko Dr. Sci. (Engin.), professor, industrial design department, Kemerovo State University, Krasnaya St. 6, Kemerovo 650000, lobasenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>

Anton V. Shafraev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Industrial design department, Kemerovo State University, Krasnaya St. 6, Kemerovo 650000, Russia, shafraia@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4512-1933>

Maxim V. Prosin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technosphere safety department, Kemerovo State University, Krasnaya St. 6, Kemerovo 650000, Russia, prosinmv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4615-5628>

Andrey G. Semenov Dr. Sci. (Engin.), professor, general mathematics and computer science department, Kemerovo State University, Krasnaya St. 6, Kemerovo 650000, Russia, agsem55@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>

Aytbek K. Kakimov Dr. Sci. (Engin.), professor, automation and information technologies department, Shakarim University, Glinka St., 20-A, Semey, 071412, Kazakhstan, bibi.53@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9607-1684>

Adilbek M. Akimov doctoral student, magister, technological equipment and mechanical engineering department, Shakarim University, Glinka St., 20-A, Semey, 071412, Kazakhstan, akimov.adilbek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9022-1207>

Contribution

Boris A. Lobasenko formulated research principles, proposed a mathematical statement of a problem

Anton V. Shafraev developed a computer program, performed calculations

Maxim V. Prosin, Aytbek K. Kakimov, Adilbek M. Akimov consultation during the study

Andrey G. Semenov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/10/2021	После редакции 10/11/2021	Принята в печать 27/11/2021
Received 21/10/2021	Accepted in revised 10/11/2021	Accepted 27/11/2021