

Совершенствование технологии переработки молочного сыра с использованием мембранных аппаратов нового типа

Б. А. Лобасенко^{id}, Р. В. Котляров^{id}, Е. К. Сазонова*^{id}, Е. А. Вагайцева, А. В. Скоморохов



Дата поступления в редакцию: 24.10.2019
Дата принятия в печать: 29.11.2019

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

*e-mail: ketsn.kem@gmail.com



© Б. А. Лобасенко, Р. В. Котляров, Е. К. Сазонова, Е. А. Вагайцева, А. В. Скоморохов, 2019

Аннотация.

Введение. Целью работы является совершенствование технологии концентрирования молочного сыра на мембранных установках, укомплектованных аппаратами с отводом поляризационного слоя. Одним из путей повышения производительности различных процессов мембранной переработки растворов является осуществление рециркуляции растворов в мембранной установке. Математическое моделирование установок позволяет сократить затраты времени на проектирование и подбор оптимальных конструктивных и режимных параметров, в связи с чем разработка математических моделей мембранного оборудования является актуальной задачей.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования является установка на базе мембранного аппарата с отводом примембранного слоя. Отличительной особенностью аппаратов является наличие трех отдельных выходящих потоков: пермеата, ядра потока ретентата и более концентрированного потока из примембранной области (концентрата). Для совершенствования процесса разработана математическая модель на основе метода передаточных функций, позволяющих описать поведение динамической системы практически любой структуры и сложности.

Результаты и их обсуждение. По результатам моделирования установлено, что для интенсификации концентрирования целесообразно производить рециркуляцию отводимого концентрата. Показано, что эффективным способом повышения интенсивности мембранного концентрирования в установках с аппаратами, отводящими примембранный слой, может быть рециркуляция части потока концентрата с передачей его в основной питающий поток. Рециркуляция части потока ретентата не является эффективной с точки зрения повышения концентрации конечного продукта. Однако она может быть использована для более полного извлечения целевого компонента. Этот аспект совершенствования технологии должен быть предметом дальнейших исследований.

Выводы. Предложена технология улучшения концентрированного молочного сыра, которая имеет практическое значение.

Ключевые слова. Мембранное концентрирование, отвод пограничного слоя, рециркуляция, передаточные функции

Для цитирования: Совершенствование технологии переработки молочного сыра с использованием мембранных аппаратов нового типа / Б. А. Лобасенко, Р. В. Котляров, Е. К. Сазонова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 4. – С. 587–593. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-587-593>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Improvement of Low-Waste Technology of Dairy Raw Material Processing Using New Type Membrane Equipment

B.A. Lobasenko^{id}, R.V. Kotlyarov^{id}, E.K. Sazonova*^{id}, E.A. Vagaytseva, A.V. Skomorokov

Received: October 24, 2019
Accepted: November 29, 2019

Kemerovo State University,
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia

*e-mail: ketsn.kem@gmail.com



© B.A. Lobasenko, R.V. Kotlyarov, E.K. Sazonova, E.A. Vagaytseva, A.V. Skomorokov, 2019

Abstract.

Introduction. Rational use of dairy raw materials is important for the national economy. The research objective was to improve the

existing technologies of milk raw material processing using new type membrane equipment with polarization layer diversion. The process was mathematically simulated according to the theory of automatic control and transfer functions.

Study objects and methods. The study featured a new installation constructed on the basis of a membrane device with membrane layer diversion. The new equipment can serve as a basis for a novel low-waste and non-waste technology. Unlike traditional membrane apparatus, this one has three flows: a more concentrated polarization layer (concentrate), a core layer of retentat, and a layer of permeat. The mathematical model of the process can describe the behavior of any dynamic system of almost any structure and complexity.

Results and its discussion. The simulation showed that recycling of the diverted concentrate can intensify the concentration. To increase the intensity of membrane concentration in such installations, partial recirculation of the concentrate flow can be recommended, with its subsequent transfer to the main flow. Partial recycling of the retentate flow did not prove effective, as it did not increase the concentration of the final product. However, it can be used for a more complete extraction of the target component. This aspect requires further research.

Conclusions. The paper introduces a new technology that improves the concentration of milk raw materials and possesses practical importance.

Keywords. Membrane concentration, diversion of upper flow, recycling, transfer functions

For citation: Lobasenko BA, Kotlyarov RV, Sazonova EK, Vagaytseva EA, Skomorokov AV. Improvement of Low-Waste Technology of Dairy Raw Material Processing Using New Type Membrane Equipment. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(4):587–593. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-587-593>.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития отрасли переработки сельскохозяйственного сырья сегодня является создание экологичных мало- и безотходных технологий. Кроме решения задач разумного природопользования, данные технологии позволяют уменьшить расходы предприятий на очистку и утилизацию отходов производства, а также снизить себестоимость продукции за счет более полной переработки поступающего сырья.

Также актуальной является разработка новых рецептур продуктов питания, обогащенных легкоусваиваемыми белками. Одним из решений поставленной задачи является широкое применение концентратов молочных и сывороточных белков в хлебопекарной, мясной и молочной промышленности [1, 2].

Перечисленные задачи могут быть решены применением мембранных технологий, которые позволяют не только наиболее полно выделять высокомолекулярные вещества (белки) из молочного сырья, но и реализуют это без их денатурации [3–5].

Одним из путей повышения производительности различных процессов мембранной переработки растворов является осуществление рециркуляции растворов в мембранной установке [6–11]. Рециркуляция пермеата применяется для ослабления концентрационной поляризации в мембранных каналах, рециркуляция ретентата – для более полного извлечения сухих веществ [6–8, 10]. Однако во всех случаях рециркуляция производится в установках на базе мембранных аппаратов традиционной конструкции. Ранее [5, 12] был предложен способ повышения эффективности мембранного концентрирования молочного сырья за счет отдельного отвода примембранной части потока раствора, который из-за концентрационной поляризации дополнительно обогащен растворен-

ными веществами. Дополнительное повышение эффективности концентрирования может быть достигнуто благодаря рециркуляции какого-либо потока в установке. Математическое моделирование установок позволяет сократить затраты времени на проектирование и подбор оптимальных конструктивных и режимных параметров, в связи с чем разработка математических моделей мембранного оборудования является актуальной задачей.

Целью представленной работы является анализ возможностей повышения эффективности мембранного концентрирования в аппаратах с отводом примембранного слоя за счет рециркуляции рабочих растворов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является установка на базе мембранного аппарата с отводом примембранного слоя. Схема аппарата представлена на рисунке 1. Основой является трубчатая мембрана, на выходе из которой имеется устройство, позволяющее отделять пристенную часть потока от ядра потока в центральной части канала мембраны. Конструкции отводящих устройств подробно описаны в [5].

Таким образом, в аппарате образуются три потока – пермеат, отделенный примембранный слой и ядро. Поток из примембранной зоны

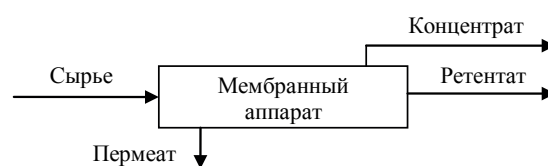


Рисунок 1. Схема разделения потоков в аппарате мембранного концентрирования

Figure 1. Flow separation scheme in a membrane concentration device

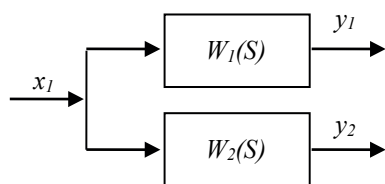


Рисунок 2. Структурная схема мембранного аппарата
Figure 2. Block diagram of the membrane device

включает жидкость из образующегося у поверхности мембраны концентрационного пограничного (поляризационного) слоя, в котором за счет концентрационной поляризации возникает повышенная концентрация задерживаемых веществ. Далее этот поток будем называть «концентратом», тогда как за ядром потока, выводимым на выходе из центральной части канала, сохраним традиционное наименование – «ретентат».

Анализ методов построения математических моделей позволяет сделать вывод о том, что одним из универсальных методов моделирования сложных динамических систем является использование аппарата передаточных функций, которые позволяют описывать динамические свойства системы практически любой структуры и сложности [13–21].

Рассмотрим односекционный мембранный аппарат с отводом поляризационного слоя (или одну ступень многосекционного аппарата). В общем случае структурная схема представлена на рисунке 2.

Для схемы приняты следующие обозначения:

x_1 – сигнал исходной концентрации (или концентрации раствора, подаваемого в мембранный аппарат), % масс.;

y_1 – сигнал, характеризующий изменение концентрации в отводимом поляризационном слое (концентрате), % масс.;

y_2 – сигнал, характеризующий изменение концентрации в ретентате, % масс.;

$W_1(S)$ – передаточная функция по каналу «входной поток – концентрат»;

$W_2(S)$ – передаточная функция по каналу «входной поток – ретентат».

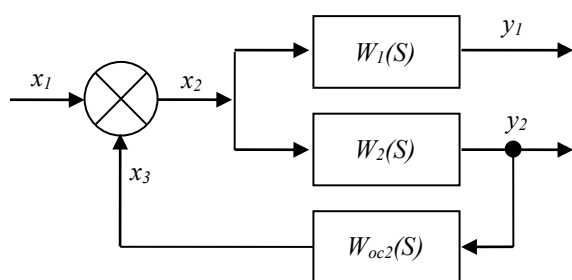


Рисунок 3. Структурная схема процесса
Figure 3. Structural diagram of the process

Целевым продуктом процесса является белок, содержащийся в наибольшем количестве в концентрате и в меньшем – в ретентате, тогда как его содержанием в пермеате можно пренебречь. Также в аппаратах данного типа нет смысла производить рециркуляцию пермеата. Это связано с тем, что рециркуляция пермеата приводит к снижению концентрационной поляризации, в то время как концентрирование раствора в исследуемом аппарате использует поляризацию как явление, повышающее эффективность процесса [6, 7]. Поэтому канал отвода пермеата здесь не рассматривается.

В общем случае передаточные функции могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} W_1(S) = k_1 \\ W_2(S) = k_2 \end{cases} \quad (1)$$

где k_1 и k_2 могут быть получены для определенных значений технологических (скорость, давление, температура), конструктивных (конструкция аппарата (турбулизирующие вставки и другие элементы), площадь мембран) и режимных (соотношение расходов концентрата и ретентата) параметров.

Коэффициенты $k_1 \geq 1$ и $k_2 \geq 1$ зависят от концентрации исходного раствора, поступающего в мембранный аппарат. Чем выше концентрация, тем ниже k_1 и k_2 выше. Это обусловлено образованием на мембране слоя отложений белкового геля, который является барьером для отвода пермеата. При отсутствии потока пермеата поляризация отсутствует, концентрация в сечении канала выравнивается и оказывается одинаковой в ретентате и концентрате. Таким образом, при концентрации исходного потока, близкой к точке гелеобразования $k_1 \geq 1$ и $k_2 \geq 1$, значительно снижается эффективность процесса концентрирования и мембрана нуждается в регенерации.

Рассмотрим случай рециркуляции ретентата. Структурная схема установки представлена на рисунке 3.

Здесь $W_{oc2}(S)$ – передаточная функция по каналу обратной связи (по рециркуляции).

$$W_{oc2}(S) = k_{oc2}, \quad k_{oc2} \in [0; 1] \quad (2)$$

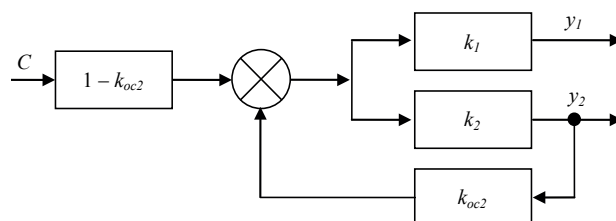


Рисунок 4. Структурная схема процесса
Figure 4. Block diagram of the process

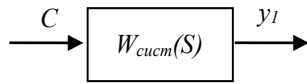


Рисунок 5. Преобразованная структурная схема процесса
Figure 5. Transformed process flow chart

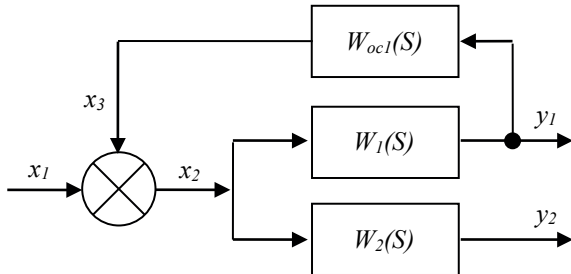


Рисунок 6. Исходная структурная схема процесса с рециркуляцией концентрата

Figure 6. Initial block diagram of the process with concentrate recycling

Основные сигналы:

$$\begin{cases} y_1 = x_2 W_1 \\ y_2 = x_2 W_2 \\ x_1 = c(1 - k_{oc2}) \\ x_2 = x_1 + x_3 \\ x_3 = y_2 W_{oc2} \end{cases} \quad (3)$$

где C – концентрация исходного раствора, поступающего в аппарат, % масс.

Структурную схему можем изобразить иначе (рис. 4).

Поскольку аппарат односекционный и целевым потоком является концентрат y_1 , то после структурного преобразования схема примет вид, представленный на рисунке 5.

Передаточная функция системы представляет собой отношение выходного и входного сигналов системы. Поэтому справедливо следующее выражение:

$$W_{\text{сист}}(S) = \frac{k_1(1-k_{oc2})}{1-k_2k_{oc2}} = \frac{y_1}{c} \quad (4)$$

Исходя из выражения (5), записан сигнал, характеризующий изменение концентрации в отво-

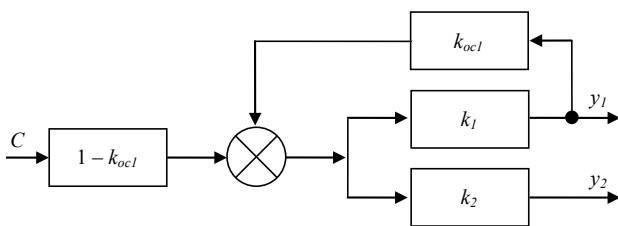


Рисунок 7. Преобразованная структурная схема процесса с рециркуляцией концентрата

Figure 7. Improved structural block diagram of the process with concentrate recycling

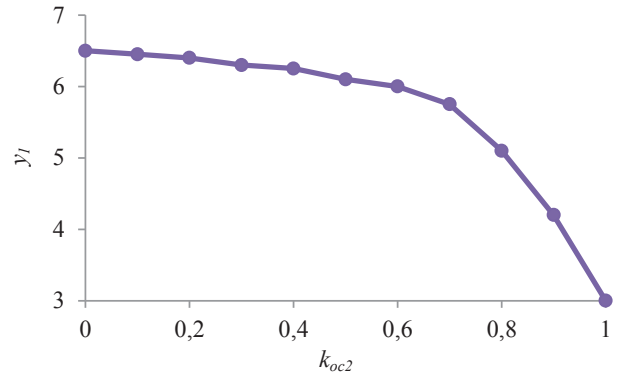


Рисунок 8. Зависимость концентрации от коэффициента k_{oc2}

Figure 8. Effect of coefficient k_{oc2} on the concentration

димом поляризационном слое (концентрате):

$$y_1 = \frac{k_1(1-k_{oc2})}{1-k_2k_{oc2}} c \quad (5)$$

Исходя из требования максимизации выходной концентрации y_1 , получаем задачу оптимизации:

$$y_1 \rightarrow \max, \text{ т. е. } \frac{k_1(1-k_{oc2})}{1-k_2k_{oc2}} c \rightarrow \max \quad (6)$$

Рассмотрим теперь установку с рециркуляцией концентрата. Структурная схема для этого случая представлена на рисунке 6.

Здесь $W_{oc1}(S)$ – передаточная функция по каналу обратной связи:

$$W_{oc1}(S) = k_{oc1}, \quad k_{oc1} \in [0; 1] \quad (7)$$

Преобразованная структурная схема представлена на рисунке 7.

Аналогично предыдущему случаю запишем передаточную функцию системы:

$$W_{\text{сист}}(S) = \frac{k_1(1-k_{oc1})}{1-k_2k_{oc1}} = \frac{y_1}{c} \quad (8)$$

$$y_1 = \frac{k_1(1-k_{oc1})}{1-k_{oc1}k_1} c \rightarrow \max \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение

Наглядно данные зависимости (6) представлены на рисунке 8.

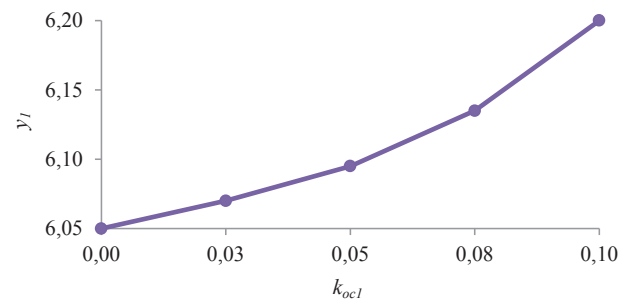


Рисунок 9. Зависимость концентрации концентрата от коэффициента k_{oc1}

Figure 9. Effect of coefficient k_{oc1} on the concentration of the concentrate

Концентрация убывает при увеличении коэффициента рециркуляции. Отсюда следует, что рециркуляция ретентата является неэффективной.

Зависимость (9) сигнала, характеризующего изменение концентрации в отводимом концентрате, от коэффициента k_{oc1} показана на рисунке 9.

Наблюдается повышение концентрации за счет рециркуляции концентрата. Заметим, что значение ограничено соотношением расходов концентрата и ретентата. Значение k_{oc1} составляет $1/10 \div 1/20$ потока, поступающего на вход аппарата. Отвод на рецикл большего количества концентрата снижает выход конечного продукта.

Выводы

На основе полученных данных можно сделать вывод, что эффективным способом повышения интенсивности мембранного концентрирования в установках с аппаратами, отводящими примембранный слой, может быть рециркуляция части потока концентрата с передачей его в основной питающий поток.

Рециркуляция части потока ретентата не является эффективной с точки зрения повышения концентрации конечного продукта. Однако она может быть использована для более полного извлечения целевого компонента. Этот аспект совершенствования технологии должен быть предметом дальнейших исследований.

Критерии авторства

Б. А. Лобасенко руководил исследованием. Р. В. Котляров разработал концепцию исследования и математическую модель. Е. К. Сазонова, Е. А. Вагайцева, А. В. Скоморохов анализировали и интерпретировали полученные результаты. Все авторы принимали существенное участие в написании, доработке и утверждении конечного варианта текста статьи и несут ответственность за все аспекты работы и гарантируют соответствующее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью всех частей работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

B.A. Lobasenko supervised the research. R.V. Kotlyarov developed the research concept and the mathematical model. E.K. Sazonova, E.A. Vagaytseva, and A.V. Skomorokov analyzed and interpreted the results. All the authors contributed to writing and improving the final version of the manuscript, which makes them responsible for all aspects of the work. The authors guarantee appropriate consideration and resolution of all possible issues related to the accuracy and integrity the work.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Храмцов, А. Г. Феномен молочной сыворотки / А. Г. Храмцов. – СПб. : Профессия, 2011. – 802 с.
2. Основополагающие принципы высокоэффективного производства функциональных молочных продуктов / В. И. Трухачев, В. В. Молочников, Т. А. Орлова [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2016. – Т. 23, № 3. – С. 52–56.
3. Справочник по переработке молочной сыворотки. Технологии, процессы и аппараты, мембранное оборудование / Г. Б. Гаврилов, А. Ю. Просеков, Э. Ф. Кравченко [и др.]. – СПб. : Профессия, 2015. – 176 с.
4. Ultrafiltration of modified milk whey / S. P. Babenyshev, V. E. Zhidkov, D. S. Mamay [et al.] // Foods and Raw Materials. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-101-110>.
5. Лобасенко, Б. А. Ультрафильтрация: Теория и практика / Б. А. Лобасенко, А. Г. Семенов, Ю. Н. Захаров. – Новосибирск : Наука, 2015. – 204 с.
6. Ochando-Pulido, J. M. The effect of permeate recirculation on the depuration of pretreated olive mill wastewater through reverse osmosis membranes / J. M. Ochando-Pulido, S. Rodriguez-Vives, A. Martinez-Ferez // Desalination. – 2012. – Vol. 286. – P. 145–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.041>.
7. Ochando-Pulido, J. M. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on RO purification of olive mill wastewater / J. M. Ochando-Pulido, G. Hodaifa, A. Martinez-Ferez // Desalination. – 2014. – Vol. 343. – P. 169–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.025>.
8. Patent 7946431B1 United States, BOID 71/02, BOID 71/06, BOID 71/52, BOID 71/56, BOID 61/00. Ultrafiltration process / Pinnau I., Ng A., Ly J., Mairal A. P.; current Assignee Membrane Technology and Research Inc. – № 12/833.311; filed: 09.07.2010; publication: 05.05.2011.
9. Mericq, J.-P. Evaluation of systems coupling vacuum membrane distillation and solar energy for seawater desalination / J.-P. Mericq, S. Laborie, C. Cabassud // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 166, № 2. – P. 596–606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.030>.
10. Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment / C. Kappel, A. J. B. Kemperman, H. Temmink [et al.] // Journal of Membrane Science. – 2014. – Vol. 453. – P. 359–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.11.023>.

11. Pouliot, Y. Separation and concentration technologies in food processing / Y. Pouliot, V. Conway, P.-L. Leclerc // *Food processing: principles and applications* / S. Clark, S. Jung, B. Lamsal. – Oxford : John Wiley & Sons Ltd., 2014. – P. 33–60. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch3>.
12. Lobasenko, B. A. Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer / B. A. Lobasenko, A. G. Semenov // *Foods and Raw Materials*. – 2013. – Vol. 1, № 1. – P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.12737/1560>.
13. Tajiri, M. Design of two-channel bilateral control systems by a transfer-function-based approach / M. Tajiri, P. Lopez, Y. Fujimoto // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2018. – Vol. 65, № 7. – P. 5655–5664. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2750621>.
14. Veloni, A. Digital control systems: theoretical problems and simulation tools / A. Veloni, N. I. Miridakis. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 435 p.
15. Guiver, C. Transfer functions of infinite-dimensional systems: positive realness and stabilization / C. Guiver, H. Logemann, M. R. Opmeer // *Mathematics of Control Signals and Systems*. – 2017. – Vol. 29, № 4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00498-017-0203-z>.
16. Abbas, A. Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit / A. Abbas // *Desalination*. – 2016. – Vol. 194, № 1–3. – P. 268–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.033>.
17. Senthilmurugan, S. Modeling of a spiral-wound module and estimation of model parameters using numerical techniques / S. Senthilmurugan, A. Ahluwalia, S. K. Gupta // *Desalination*. – 2005. – Vol. 173, № 3. – P. 269–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.034>.
18. Won, C.-H. Evaluation of optimal reuse system for hydrofluoric acid wastewater / C.-H. Won, J. Choi, J. Chung // *Journal of Hazardous Materials*. – 2012. – Vol. 239–240. – P. 110–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.004>.
19. Sobana, S. Identification, modelling and control of continuous reverse osmosis desalination system: A review / S. Sobana, R. C. Panda // *Separation Science and Technology*. – 2011. – Vol. 46, № 4. – P. 551–560. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496395.2010.534526>.
20. Defeating the sustainability challenge in batch processes through low-cost utilities usage reduction / F. Rossi, F. Manenti, K. A. Kozin [et al.] // *Chemical Engineering Transactions*. – 2014. – Vol. 39. – P. 697–702. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1439117>.
21. Bartman, A. R. Nonlinear model-based control of an experimental reverse-osmosis water desalination system / A. R. Bartman, P. D. Christofides, Y. Cohen // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2009. – Vol. 48, № 13. – P. 6126–6136. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie900322x>.


References

1. Khramtsov AG. Fenomen molochnoy syvorotki [Milk whey phenomenon]. St. Petersburg: Professiya; 2011. 802 p. (In Russ.).
2. Trukhachev VI, Molochnikov VV, Orlova TA, Khramtsov AG. The main principles of high effective manufacturing of functional milk products. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2016;23(3):52–56. (In Russ.).
3. Gavrilov GB, Prosekov AYU, Kravchenko EhF, Gavrilov BG. Spravochnik po pererabotke molochnoy syvorotki. Tekhnologii, protsessy i apparaty, membrannoe oborudovanie [Handbook of whey processing. Technologies, processes and devices, membrane equipment]. St. Petersburg: Professiya; 2015. 176 p. (In Russ.).
4. Babenyshev SP, Zhidkov VE, Mamay DS, Utkin VP, Shapakov NA. Ultrafiltration of modified milk whey. *Foods and Raw Materials*. 2016;4(2):101–110. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-101-110>.
5. Lobasenko BA, Semenov AG, Zakharov YuN. Ul'trafil'tratsiya: Teoriya i praktika [Ultrafiltration: Theory and Practice]. Novosibirsk: Nauka; 2015. 204 p. (In Russ.).
6. Ochando-Pulido JM, Rodriguez-Vives S, Martinez-Ferez A. The effect of permeate recirculation on the depuration of pretreated olive mill wastewater through reverse osmosis membranes. *Desalination*. 2012;286:145–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.041>.
7. Ochando-Pulido JM, Hodaifa G, Martinez-Ferez A. Permeate recirculation impact on concentration polarization and fouling on RO purification of olive mill wastewater. *Desalination*. 2014;343:169–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.025>.
8. Pinnau I, Ng A, Ly J, Mairal AP. Ultrafiltration process. US Patent 7946431B1, 2011.
9. Mericq J-P, Laborie S, Cabassud C. Evaluation of systems coupling vacuum membrane distillation and solar energy for seawater desalination. *Chemical Engineering Journal*. 2011;166(2):596–606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.030>.
10. Kappel C, Kemperman AJB, Temmink H, Zwijnenburg A, Rijnaarts HHM, Nijmeijer K. Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2014;453:359–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.11.023>.
11. Pouliot Y, Conway V, Leclerc P-L. Separation and concentration technologies in food processing. In: Clark S, Jung S, Lamsal B, editors. *Food processing: principles and applications*. Oxford: John Wiley & Sons Ltd.; 2014. pp. 33–60. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch3>.


12. Lobasenko BA, Semenov AG. Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. *Foods and Raw Materials*. 2013;1(1):74–81. DOI: <https://doi.org/10.12737/1560>.
13. Tajiri M, Lopez P, Fujimoto Y. Design of two-channel bilateral control systems by a transfer-function-based approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(7):5655–5664. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2750621>.
14. Veloni A, Miridakis NI. *Digital control systems: theoretical problems and simulation tools*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 435 p.
15. Guiver C, Logemann H, Opmeer MR. Transfer functions of infinite-dimensional systems: positive realness and stabilization. *Mathematics of Control Signals and Systems*. 2017;29(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00498-017-0203-z>.
16. Abbas A. Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit. *Desalination*. 2016;194(1–3):268–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.033>.
17. Senthilmurugan S, Ahluwalia A, Gupta SK. Modeling of a spiral-wound module and estimation of model parameters using numerical techniques. *Desalination*. 2005;173(3):269–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.034>.
18. Won C-H, Choi J, Chung J. Evaluation of optimal reuse system for hydrofluoric acid wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2012;239–240:110–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.004>.
19. Sobana S, Panda RC. Identification, modelling and control of continuous reverse osmosis desalination system: A review. *Separation Science and Technology*. 2011;46(4):551–560. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496395.2010.534526>.
20. Rossi F, Manenti F, Kozin KA, Goryunov AG. Defeating the sustainability challenge in batch processes through low-cost utilities usage reduction. *Chemical Engineering Transactions*. 2014;39:697–702. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1439117>.
21. Bartman AR, Christofides PD, Cohen Y. Nonlinear model-based control of an experimental reverse-osmosis water desalination system. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2009;48(13):6126–6136. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie900322x>.

Сведения об авторах


Лобасенко Борис Анатольевич

д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: tppp@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>

Котляров Роман Витальевич

канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4152-8149>

Сазонова Екатерина Константиновна

ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-1320-9255>

Вагайцева Елена Алексеевна


канд. техн. наук, доцент кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-68, e-mail: vagaitseva@mail.ru

Скоморохов Александр Владимирович


студент кафедры автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

Information about the authors


Boris A. Lobasenko

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Professor of the Department of Technological Design of Food Productions, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: tppp@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-0245-7904>

Roman V. Kotlyarov

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Automation of Manufacturing Processes and Computer-Aided Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4152-8149>

Ekaterina K. Sazonova

Assistant of the Department of Automation of Manufacturing Processes and Computer-Aided Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-1320-9255>

Elena A. Vagaitseva

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Design of Food Production, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-68, e-mail: vagaitseva@mail.ru

Aleksandr V. Skomorohov

Student of the Department of Automation of Manufacturing Processes and Computer-Aided Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia