

Создание мембранных аппаратов трубчатого типа при исследовании процессов в биореакторах

Андрей И. Ключников¹ kaivanov@mail.ru
Андрей И. Потапов¹ a.i.potapov@rambler.ru
Валентин В. Колядин¹ kolyadin.valya@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия

Реферат. В данном исследовании рассмотрены и изучены способы интенсификации процессов микро- и ультрафильтрации при помощи борьбы с эффектом концентрационной поляризации. Описано отрицательное воздействие концентрационной поляризации на процесс разделения фильтруемой жидкости и на мембранную поверхность (из-за повышения концентрации у мембранной поверхности снижается ее селективность и удельная производительность). Рассмотрена физическая картина протекающих явлений в плоском мембранном канале с известными геометрическими размерами; выделены 4 участка, имеющих различное влияние на процесс фильтрации. Проанализировано уравнение материального баланса, выявлено, что коэффициент массопереноса k_m уменьшается, вследствие роста толщины пограничного слоя. Основными параметрами значительно влияющими на процесс микрофильтрации являются: величина расхода G исходного раствора, коэффициент массопереноса k_m , с уменьшением которого снижается G . Проведен анализ теоретических и экспериментальных данных, показывающий, что решающую роль на ход процесса микрофильтрации играют: режим движения исходного раствора, физико-химические свойства обрабатываемой среды и геометрия мембранного канала. Обоснована перспективность использования пульсационного поля в мембранных биореакторах и необходимость концептуального подхода для разработки перспективных конструкций аппаратов трубчатого типа. Рассмотрена необходимость конструирования трубчатых мембран сложных геометрических форм, с возможностью размещения в них турбулизирующих устройств, их перемещения относительно друг друга, что приведет к появлению достаточного количества возможностей для создания гидродинамических неустойчивостей различной интенсивности. В статье затронуты применение пульсационных режимов разрушения или разрыхления поляризационного слоя при помощи возвратно-поступательного движения концентрата, периодической регенерации мембран тангенциальным пульсирующим потоком или обратной прокачкой.

Ключевые слова: мембранные аппараты, концептуальный подход, концентрационная поляризация, пульсационное поле

Conceptual bases of creation of the membrane device of tubular type for studying the in bioreactors

Andrei I. Klyuchnikov¹ kaivanov@mail.ru
Andrei I. Potapov¹ a.i.potapov@rambler.ru
Valentin V. Kolyadin¹ kolyadin.valya@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution av., 19, Voronezh, 394066, Russia

Summary. In this study, methods for intensifying the processes of micro- and ultrafiltration by combating the effect of concentration polarization are considered and studied. The negative effect of concentration polarization on the process of separation of the filtered liquid and on the membrane surface is described (because of the increased concentration of the membrane surface, its selectivity and specific productivity decrease). The physical picture of the flowing phenomena in a flat membrane channel with known geometric dimensions is considered; 4 sections with different effects on the filtration process were identified. The equation of material balance is analyzed, it is revealed that the mass transfer coefficient k_m decreases, due to the growth of the thickness of the boundary layer. The main parameters significantly influencing the process of microfiltration are: the amount of flow G of the initial solution, the mass transfer coefficient k_m , with decreasing it decreases G . The analysis of theoretical and experimental data is carried out showing that the decisive role in the course of the microfiltration process is played by the motion regime of the initial solution, Chemical properties of the medium to be treated and the geometry of the membrane channel. The prospects for using the pulsating field in membrane bioreactors and the need for a conceptual approach for the development of promising tubular-type structures are grounded. The necessity of designing tubular membranes of complex geometric shapes with the possibility of placing turbulent devices in them, their displacement relative to each other, which will lead to the appearance of a sufficient number of possibilities for creating hydrodynamic instabilities of various intensities, is considered. The article touches upon the application of pulsation regimes of destruction or loosening of the polarization layer by means of reciprocating motion of the concentrate, periodic regeneration of membranes by a tangential pulsating flow or by reverse pumping.

Keywords: membrane apparatus, conceptual approach, concentration polarization, pulsating field

Для цитирования

Ключников А.И., Потапов А.И., Колядин В.В. Концептуальные основы создания мембранных аппаратов трубчатого типа при исследовании процессов в биореакторах // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 55–61. doi:10.20914/2310-1202-2017-1-55-61

For citation

Klyuchnikov A.I, Potapov A.I, Kolyadin V.V. Conceptual bases of creation of the membrane device of tubular type for studying the in bioreactors. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2017. Vol. 79. no. 1. pp. 55–61. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-1-55-61

Введение

подавляющее большинство выпускаемых на сегодняшний день мембран и установок признаны решать широкий перечень технологических задач. Однако, интенсификация процессов микро- и ультрафильтрации за счет создания гидродинамических неустойчивостей на межфазной границе «мембрана–продукт» ограничена конструктивными особенностями мембранной системы и комплексом свойств различной природы обрабатываемых растворов.

Более того, в существующих мембранных аппаратах заложены те или иные способы борьбы с концентрационной поляризацией, имеющие постоянный характер воздействия на примембранный слой (ограниченные возможности по интенсификации). Например, спейсеры, которые неподвижно установлены в мембранном канале.

Конструктивные особенности некоторых мембран, например, керамических многоканальных, полволоконных, физически не позволяют размещать внутри них технические средства, направленные на интенсификацию гидродинамических условий.

Поэтому, приходится прибегать к таким методам интенсификации, которые бы позволили воздействовать на примембранный слой, приводя к его удалению с поверхности мембраны.

Концентрационная поляризация приводит к загрязнению мембран. Но этим далеко не исчерпывается ее отрицательная роль в мембранных процессах. Именно она определяет сопротивление массообмену со стороны разделяемого продукта. Из-за повышения концентрации у мембранной поверхности снижается ее селективность и удельная производительность. Поскольку отношение концентраций растворенных веществ у поверхности мембраны и в объеме продукта экспоненциально возрастает с увеличением удельной производительности, то концентрационная поляризация может явиться фактором, лимитирующим проницаемость мембран в процессах мембранного разделения. И усилия, направленные на создание новых высокопроизводительных мембранных аппаратов, могут оказаться напрасными, если одновременно не развивать способы ее эффективного снижения [1].

Рассмотрим физическую картину протекающих явлений в плоском мембранном канале с известными геометрическими размерами (рисунок 1).

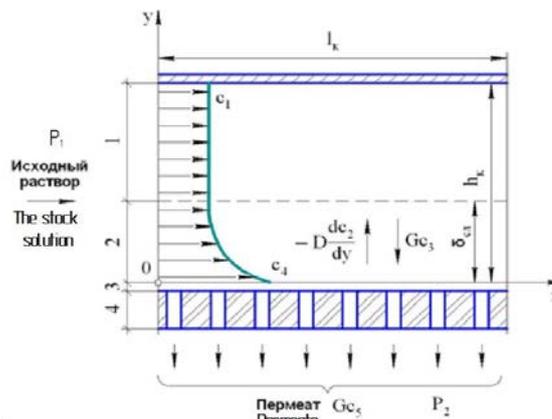


Рисунок 1. Физическая модель процесса микрофильтрации

Figure 1. Physical model of the microfiltration process

Участок 1. В рассматриваемом интервале профиля концентраций преобладают составные части потоков исходного раствора и пермеата, протекающих вдоль поверхности мембраны. Для приближенной оценки массопереноса можно принять допущение о неизменности физико-химических свойств компонентов исходного раствора и пермеата.

Участок 2 представляет собой пограничный слой толщиной $\delta_{сл}$, характеризующийся градиентом концентрации $D(dc_2/dy)$, давления ΔP , скорости в направлении перпендикулярном к поверхности мембраны. В толще пограничного слоя растворенное вещество переносится к поверхности мембраны основным потоком Gc_3 , одна часть его за счет молекулярной диффузии переносится в противоположном направлении, другая часть – через мембрану с возможной адсорбцией на ее поверхности.

Участок 3. В рассматриваемом участке могут одновременно протекать диффузионные и адсорбционные процессы, как на поверхности мембраны, так и внутри нее.

Участок 4 представляет собой мембрану, с различными слоями в зависимости от материала и способа ее изготовления. Процессы массопереноса осуществляются, главным образом за счет диффузии и конвекции. Наличие различных слоев, составляющих мембрану, их количество и свойства будут влиять на величину общего гидравлического сопротивления мембраны и, соответственно, на проницаемость и селективность.

Слой на поверхности мембраны, состоящий преимущественно из растворенных молекул, в процессе микрофильтрации постепенно увеличивается, концентрация растворенного вещества в примембранных границах также растет и достигает максимума у поверхности мембраны. Формируется пограничный слой, в котором образуется диффузионный поток $-D(dc_2/dy)$ в направлении противоположном основному разделяемому потоку Gc_3 .

Равновесное состояние в этом случае будет достигнуто при условии:

$$-D \frac{dc_2}{dy} + Gc_3 = Gc_5 \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой уравнение материального баланса

Введем граничные условия:

$$\begin{aligned} y = 0 &\rightarrow c_3 = c_4; \\ y = \delta_{cl} &\rightarrow c_3 = c_1. \end{aligned} \quad (2)$$

После преобразования уравнения (1) с учетом граничных условий (2) получим:

$$\ln \frac{c_4 - c_5}{c_1 - c_5} = \frac{G\delta_{cl}}{D} \quad (3)$$

или

$$\frac{c_4 - c_5}{c_1 - c_5} = \exp\left(\frac{G\delta_{cl}}{D}\right). \quad (4)$$

Отношение $D/\delta_{cl} = k_m$ представляет собой коэффициент массопереноса, с учетом которого:

$$\frac{c_4 - c_5}{c_1 - c_5} = \exp\left(\frac{G}{k_m}\right). \quad (5)$$

Анализируя равенство можно показать, что при увеличении отношения концентраций $(c_4 - c_5)/(c_1 - c_5)$ коэффициент массопереноса k_m уменьшается, вследствие роста толщины пограничного слоя. Основными параметрами, значительно влияющими на процесс микрофильтрации, являются величины расхода G исходного раствора, коэффициента массопереноса k_m , с уменьшением которого снижается и G .

Поскольку в процессе микрофильтрации значения коэффициента диффузии D очень малы, а величины расходов исходного раствора Gc_3 и Gc_5 относительно велики, то явление концентрационной поляризации имеет решающую роль в ходе процесса разделения и накладывает ограничения на конструкции применяемых мембранных аппаратов, требует специальных условий организации режима движения разделяемых растворов вдоль мембранной поверхности [2].

Для того чтобы оценить, насколько существенным является организация гидродинамических режимов течения потока исходного раствора, приведем критериальные уравнения, связывающие параметры процесса микрофильтрации и геометрию применяемой конструкции мембранного модуля.

Число Шервуда

$$Sh = k_m \cdot h_k \quad (6)$$

где h_k – геометрическая высота мембранного канала, м.

Для трубчатого мембранного канала число Шервуда при ламинарном режиме движения

$$Sh = 1,62(Re \cdot Sc \cdot h_k / L)^{0,33} \quad (7)$$

при турбулентном режиме

$$Sh = 0,44Re^{0,75} \cdot Sc^{0,33} \quad (8)$$

Преобразуем уравнения (7) и (8) с учетом (6) для ламинарного режима:

$$k_m = \frac{1,62D}{d_k^{0,67}} \left(\frac{Re \cdot Sc}{L}\right)^{0,33}. \quad (9)$$

для турбулентного режима:

$$k_m = \frac{0,04DRe^{0,75} Sc^{0,33}}{h_k}, \quad (10)$$

где $Re = h_{kv}/\eta$ – число Рейнольдса, v – скорость потока исходного раствора, м/с; η – кинематическая вязкость исходного раствора, м²/с; Sc – число Шмидта.

Уравнения (7) и (8) для плоского мембранного канала после аналогичных преобразований для ламинарного режима:

$$k_m = \frac{1,85D}{h_k^{0,67}} \left(\frac{Re \cdot Sc}{L}\right)^{0,33}. \quad (11)$$

для турбулентного режима:

$$k_m = \frac{0,04DRe^{0,75} Sc^{0,33}}{h_k}. \quad (12)$$

Как видно из представленных зависимостей (9)–(12), возможностей для увеличения коэффициента массопереноса в процессе микрофильтрации достаточно в рамках решаемой задачи.

Решающую роль на ход процесса микрофильтрации играют режим движения исходного раствора, физико-химические свойства, геометрия мембранного канала. Известно, что коэффициент диффузии можно существенно увеличить за счет повышения температуры разделяемого раствора, что не всегда технологически возможно, а в некоторых случаях – недопустимо, поэтому наиболее перспективными вариантами увеличения коэффициента массопереноса выступают вышеназванные параметры.

При грамотном подходе к организации мембранных процессов в биореакторах с использованием пульсационного поля, обеспечивается эффективное воздействие гидродинамических параметров, изменяющихся во времени, на слой высокой концентрации, который за счет создаваемого насосного эффекта, не достигает устойчивого равновесия с мембраной и, поэтому легко может удален. Особенно актуальным является использование данного способа интенсификации в мембранных процессах,

связанных с обработкой жидкостей микробиологического происхождения, содержащих микроорганизмы, подверженных инактивации, например, культуральных жидкостей.

Исследована проницаемость мембран с размерами пор 5,0 и 0,40 мкм при наложении пульсационного поля со следующими характеристиками: частота 0,002 Гц; периодичность 3–5 с; амплитуда 0,1–0,25 МПа; величина тангенциальной скорости 2,0–3,0 м/с. При наложении пульсационного поля проницаемость мембран увеличивается в 1,5–2,5 раза по сравнению с отсутствием каких-либо мероприятий по интенсификации (рисунок 2).

Анализ влияния концентрации дрожжевых клеток на проницаемость выбранных керамических мембран (рисунок 3) показал условия проявления сопутствующего процесса – закупорки пор, которая была незначительной.

Концептуальный подход заключается в необходимости разработок мембранных аппаратов с таким расчетом, чтобы они уже содержали технические средства и приемы по вариативной интенсификации гидродинамики в мембранном канале. Большинство же научных изысканий направлены на интенсификацию мембранного процесса в уже имеющейся или эксплуатирующейся технике. Уровень интенсификации, в этом случае, сильно ограничен.

Необходимо подчеркнуть создание мембран сложных геометрических форм (рисунок 4, а), в виде трубок большого диаметра (рисунок 4 б, в), позволяющих размещать в них движущиеся многообразные турбулизирующие устройства для создания гидродинамических неустойчивостей различной интенсивности. Мембраны должны иметь возможность перемещаться и/или вращаться относительно друг друга, создавая сочетанием своих геометрических форм каналы переменного сечения. В этом случае, появляется достаточно возможностей для создания гидродинамических неустойчивостей различной интенсивности. Причем уровень накладываемой интенсивности имеет возможность регулирования в достаточно широких пределах. Сочетание различных геометрических форм технических средств, размещаемых в мембранном канале, их динамических характеристик, алгоритмов движения, с гидродинамическими параметрами разделяемого потока создают условия для концептуального подхода к созданию мембранных аппаратов с низким уровнем концентрационной поляризации [5–10].

Все это в итоге позволит создавать более универсальные мембранные аппараты для решения различных технологических задач в пищевой промышленности.

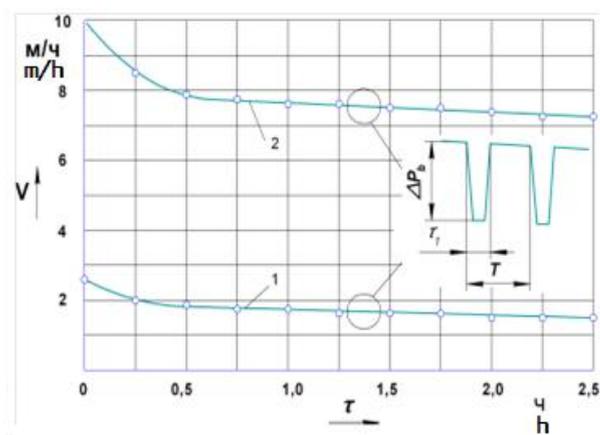


Рисунок 2. Зависимость удельной скорости микрофльтрации пива на керамических мембранах с различным размером пор при наложении пульсаций: 1 – 0,40 мкм; $\Delta P_b = 0,25$ МПа; $\tau_1 = 3$ с; $T = 600$ с; 2 – 5,0 мкм; $\Delta P_b = 0,10$ МПа; $\tau_1 = 5$ с; $T = 600$ с

Figure 2. Dependence of beer microfiltration specific rate on ceramic membranes with various pore size upon application of pulsations: 1 – 0.40 microns; $\Delta P_b = 0.25$ MPa; $\tau_1 = 3$; $T = 600$ seconds; 2 – 5.0 microns; $\Delta P_b = 0.10$ MPa; $\tau_1 = 5$; $T = 600$ s.

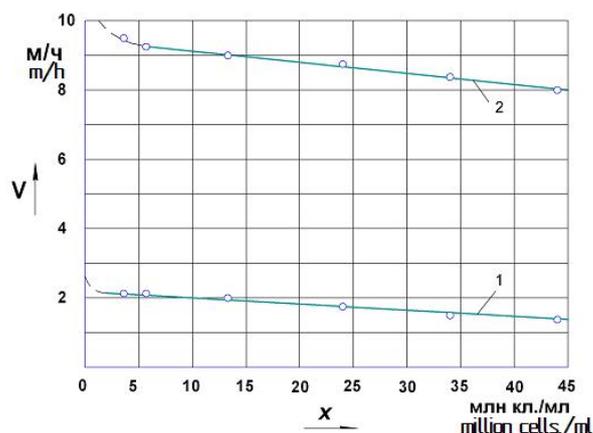


Рисунок 3. Зависимость удельной скорости микрофльтрации пива на керамических мембранах с различным размером пор от концентрации дрожжевых клеток в фильтруемом пиве: 1 – 0,40; 2 – 5,0 мкм

Figure 3. The dependence of the specific rate of beer on ceramic microfiltration membranes with a pore size different from the yeast cell concentration in the filtered beer: 1 – 0.40; 2 – 5.0 microns.

Следует отметить, что в последние годы значительное внимание уделяется разработке пульсационных режимов разрушения или разрыхления поляризованного слоя. Этот эффект достигается возвратно-поступательным движением концентрата, периодической регенерацией мембраны тангенциальным пульсирующим потоком фильтрата или более труднореализуемым техническим приемом – обратной прокачкой. Эффективность пульсационных режимов обычно повышается с ростом частоты пульсаций. К высокочастотным пульсационным режимам можно

отнести интенсификацию массопереноса ультразвуковыми или механическими колебаниями. Техническая реализация пульсационных режимов осуществляется периодическим перекрытием линии фильтрата, в результате чего происходит выравнивание давления по обе стороны мембраны, или переключением давления на линию

фильтрата, обеспечивающих обратную прокачку. Разрушение и разрыхление слоя осадка достигается также возвратно-поступательным движением концентрата с помощью изменения направления его потока или введением в линию концентрата подвижных элементов, обеспечивающих модуляцию рабочего давления.

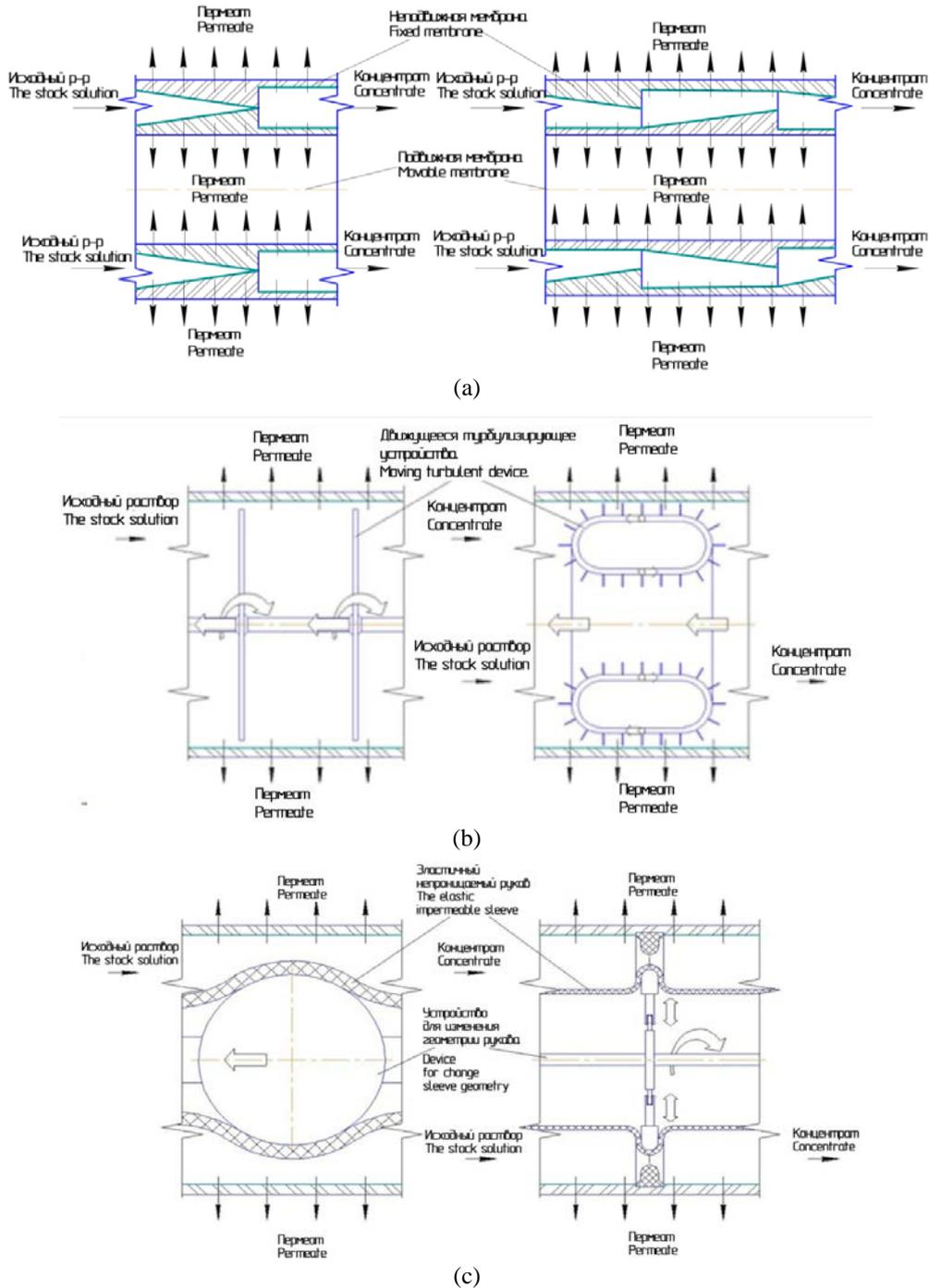


Рисунок 4. Концептуальный подход к интенсификации процессов микро- и ультрафильтрации технологических жидкостей: (а) – за счет создания мембран сложных геометрических форм, перемещающихся относительно друг друга; (б) – в виде пористых трубок большого диаметра; (с) – с техническими средствами для создания гидродинамических неустойчивостей различной интенсивности

Figure 4. Conceptual approach to the intensification of the processes of micro- and ultrafiltration process liquids: (a) – by creating a membrane complex geometric shapes that move relative to each other; (b) – in the form of porous tubes of large diameter; (c) – with the technical means for creating hydrodynamic instabilities of varying intensity

Заключение

Физические методы регенерации, например, воздействие на мембрану магнитного и электрического полей, ультразвуковых колебаний не нашли массового применения в мембранной технике. Несмотря на очевидные преимущества физических методов воздействия

на примембранный слой высокой концентрации, сами эти методы самостоятельно удалить с поверхности мембраны отложения не могут, т. е. должны применяться в комплексе с известными способами борьбы с концентрационной поляризацией, например, в сочетании с гидродинамическими режимами воздействия, химическими промывками и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1 Семенов А. Г., Лобасенко Б. А. Интенсификация ультрафильтрационного концентрирования сывороточных белков в установках с керамическими мембранами // Молочная индустрия мира и Российской Федерации: материалы Междунар. науч. практ. конф. Москва, 2013.

2 Тимофеев А.Е., Лобасенко Б.А., Котляров Р.В. Разработка математической модели процесса мембранного концентрирования на основе передаточных функций // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 1. С. 1–5.

3 Chakraborty D., Sarkar D., Bhattacharjee C. Modeling and simulation of rotating disk-membrane module in ultrafiltration of bovine serum albumin // Separation science and technology. 2013. Т. 48. № 17. С. 2549–2566.

4 Шушпанников А. С., Лобасенко Б. А., Котляров Р. В. Исследование конструктивных и режимных параметров ультрафильтрационного аппарата при концентрировании обезжиренного молока // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 3. С. 85–89.

5 Стефанкин А. Е., Крохалев А. А., Котляров Р. В., Кригер О. В., Dengra, J. P., Иванец В. Н. Подбор параметров гидродинамической вставки мембранной установки для переработки крови сельскохозяйственных животных // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 4. С. 106–112.

6 Лобасенко Б. А., Иванец В. Н., Сазонова Е. К., Стефанкин А. Е., Котляров Р. В. Моделирование мембранных установок непрерывного действия укомплектованных аппаратами с отводом диффузионного слоя // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3. С. 112–117.

7 Лобасенко Б. А., Семенов А. Г., Захаров Ю. Н. Ультрафильтрация: Теория и практика Новосибирск: Наука, 2015. 204 с.

8 Ключников А. И., Пономарев А. Н., Полянский К. К. Анализ концентрационной поляризации в процессе микрофильтрации пива // Вестник ТГУ. Т. 17. № 2. 2012. С. 1–4.

9 Ключников А. И. Повышение эффективности мембранных процессов с использованием трубчатых керамических мембран // Материалы ЛII отчетной научной конференции за 2013 год: В 3 ч. Ч. 2. 2013. С. 15.

10 Беккер В. Ф. Моделирование химико-технологических объектов управления: Учебн. Пособие. Москва. РИОР: ИНФРАМ-М, 2014. 142 с.

REFERENCES

1 Semenov A. G., Lobasenko B. A. Intensifikatsiya ul'trafil'tratsionnogo kontsentrirvaniya syvorotochnykh belkov v ustanovkakh s keramicheskimi membranami Molochnaya industriya mira i Rossiiskoi Federatsii: materialy Mezhdunar. nauch.prakt. konf. [Intensification of ultrafiltration concentrating of whey proteins in plants with ceramic membranes]. Moscow. 2013. pp. 123–125. (in Russian).

2 Timofeev A. E., Lobasenko B. A., Kotlyarov R. V. Development of mathematical model of process of membrane concentration on the basis of transfer functions. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production]. 2013. no. 1. pp. 1–5. (in Russian).

3 Chakraborty D., Sarkar D., Bhattacharjee C. Modeling and simulation of rotating disk-membrane module in ultrafiltration of bovine serum albumin. *Separation science and technology*. 2013. no. 17. pp. 2549–2566.

4 Shushpannikov A. S., Lobasenko B. A., Kotlyarov R. V. The study of the design and operating parameters of the ultrafiltration apparatus for the concentration of skim milk. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production]. 2013. no. 3. pp. 85–89. (in Russian).

5 Stefankin A. E., Krokhalev A. A., Kotlyarov R. V., Kriger O. V., Dengra, J. P., Ivanets V. N. Selection of parameters for hydrodynamic insertion of a membrane unit for processing the blood of farm animals. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production]. 2014. no. 4. pp. 106–112. (in Russian).

6 Lobasenko B. A., Ivanets V. N., Sazonova E. K., Stefankin A. E., Kotlyarov R. V. Modelling of membrane units for continuous deistvuyuschih machines with a drain diffusion layer. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production]. 2016. vol. 42. no. 3. pp. 112–117. (in Russian).

7 Lobasenko B. A., Semenov A. G., Zakharov Yu. N. Ul'trafil'tratsiya: Teoriya i praktika [Ultrafiltration: Theory and practice]. Novosibirsk. Nauka. 2015. 204 p. (in Russian).

8 Klyuchnikov A. I., Ponomarev A. N., Polyanskii K. K. Analysis of concentration polarization in the process of microfiltration of beer. *Vestnik TGU* [Proceedings of TGU]. 2012. vol. 17. no. 2. pp. 1–4. (in Russian).

9 Klyuchnikov A. I. Improving the efficiency of membrane processes using tubular ceramic membranes. *Materialy LII otchetnoi nauchnoi konferentsii za 2013 god: V 3 ch. Ch. 2.* [LII the reporting materials scientific conference 2013: in 3 parts. Part 2] Voronezh. VSUET. 2013. pp. 15. (in Russian).

10 Bekker V. F. Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh ob"ektov upravleniya. [Modeling of chemical-technological objects of management]. Moscow. RIOR: INFRAM-M 2014. 142 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей И. Ключников д. т. н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия, kaivanov@mail.ru

Андрей И. Потапов к. т. н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия, a.i.potapov@rambler.ru

Валентин В. Колядин магистр, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия, kolyadin.valya@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Андрей И. Ключников обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Андрей И. Потапов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию

Валентин В. Колядин несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 14.01.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 03.02.2017

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrei I. Klyuchnikov doctor of technical sciences, assistant professor, machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technology Revolution Av., 19, Voronezh, 394066, Russia, kaivanov@mail.ru

Andrei I. Potapov candidate of technical sciences, assistant professor, machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technology Revolution Av., 19, Voronezh, 394066, Russia, a.i.potapov@rambler.ru

Valentin V. Kolyadin master student, machines and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394066, Russia, kolyadin.valya@mail.ru

CONTRIBUTION

Andrei I. Klyuchnikov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Andrei I. Potapov wrote the manuscript, correct it before filing in editing

Valentin V. Kolyadin is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 1.14.2017

ACCEPTED 2.3.2017