

УДК 637.1:621.512.8

А.Е. Тимофеев, Б.А. Лобасенко, Р.В. Котляров**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МЕМБРАННОГО АППАРАТА С ОТВОДОМ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ**

Рассмотрены перспективы переработки молочной сыворотки мембранными методами. Предложен мембранный аппарат с отводом диффузионного слоя. Исследовано влияние конструктивных параметров аппарата на эффективность концентрирования молочной сыворотки. Проведен регрессионный анализ данного влияния. Выявлены рациональные значения конструктивных параметров.

Мембранный аппарат, диффузионный слой, концентрирование, молочная сыворотка, конструктивные параметры, регрессионный анализ.

Введение

Кузбасс – богатейший угольный край и вместе с тем один из экологически неблагоприятных регионов России. Для поддержания иммунитета жителям Кемеровской области необходимо сбалансированное питание, насыщенное необходимым количеством макро- и микроэлементов. В связи с этим возникает потребность в оборудовании для производства продуктов питания, содержащих комплекс необходимых для жизнедеятельности компонентов, в частности аминокислот.

Ряд незаменимых аминокислот содержится в молочных и сывороточных белках, которые, находясь в растворенном состоянии, легко усваиваются организмом. Молоко содержит два типа основных белков: казеин (80 %) и сывороточный белок (20 %). При производстве сыра казеин уходит в творог и отделяется от сыворотки. Затем из сыворотки отделяют сывороточный белок и очищают до различных концентраций. Сывороточные белки состоят из ряда отдельных белковых компонентов: бета-лактоглобулин, альфа-лактальбумин, иммуноглобулины, бычий сывороточный альбумин, гликомакропептид, лактоферрин, лактопероксидаза, лизоцим [3]. Биологическая ценность сывороточных белков выше, чем у многих других высококачественных пищевых белков, таких как яйца, говядина или соя. Сывороточный белок богат цистеином и метионином. Важность этих серосодержащих аминокислот заключается в поддержании уровня антиоксидантов в организме.

Особую питательную и биологическую ценность имеют продукты, содержащие белки в нативном виде. Поскольку белковые вещества термолабильны, для их концентрирования в настоящее время успешно применяется мембранная технология, в частности методы ультра- и микрофильтрации [1, 2].

Концентрирование смесей мембранными методами в отличие от широко применяемых методов производится без фазовых превращений и обычно при температуре окружающей среды. Белок в процессе концентрирования продукта не претерпевает изменений, сохраняет натуральную форму и, соответственно, полезные свойства, чего нельзя отнести к белковым концентратам,

полученным стандартными методами. Кроме того, применяемая в мембранных методах аппаратура проще, компактнее и дешевле. Следует отметить, что мембранные методы в ряде случаев оказываются не только более экономичными и менее энергоемкими по сравнению с другими методами, но часто позволяют полнее использовать сырье и энергию, т.е. существует возможность переработки вторичного сырья и отходов.

Однако мембранная технология используется не только в молочной отрасли, но и в других отраслях народного хозяйства: в химической и нефтехимической промышленности, в биотехнологии и медицине, в пищевой промышленности (пивобезалкогольная промышленность, производство соков), при очистке сточных вод и т.д.

Основным недостатком мембранного метода является образование слоя задерживаемых веществ на внутренней поверхности мембраны, который со временем уплотняется и значительно снижает производительность процесса – так называемое явление концентрационной поляризации и гелеобразования. Поэтому в настоящее время перспективным направлением является использование концентрационной поляризации. Данный способ предложен авторами [4]. Суть способа заключается в отводе концентрата задерживаемых веществ из области, прилегающей к поверхности мембраны. При этом производится мембранное фильтрование через мембрану. Отвод концентрата с большим содержанием растворенных веществ и использование его в качестве готового продукта или исходного раствора для последующего концентрирования позволяет интенсифицировать процесс переработки сырья. В данном направлении разработан ряд конструкций, которые тем не менее характеризуются невысокой производительностью. В связи с этим разработка и исследование мембранного аппарата с отводом диффузионного слоя является актуальной научной задачей.

Целью данной статьи является анализ влияния конструктивных особенностей мембранного аппарата с отводом диффузионного слоя на процесс концентрирования молочной.

Объекты и методы исследования

В рамках данного направления предложен мембранный аппарат, который включает устройство для отвода диффузионного слоя (рис. 1). Устройство состоит из корпуса 1 с щелями 2, находящегося внутри кожуха 3, внутренняя поверхность которого выполнена с переменным сечением, патрубка для отвода продукта 4. В полости корпуса находится подвижный шток 5. Устройство присоединяется к трубчатой мембране 6.

Устройство работает следующим образом. Основная часть исходного раствора под давлением подается в канал мембранного аппарата, за счет создания движущей силы в канале аппарата происходит мембранная фильтрация, при этом на внутренней поверхности мембраны образуется слой с повышенным содержанием растворенных веществ (явление концентрированной поляризации). Поток и верхняя часть образовавшегося слоя устремляются в корпус 1, где происходит их разделение: поток поступает во внутреннюю полость штока 5, слой – в зазор между корпусом и штоком. Интенсивный отвод слоя в кожухе создается с помощью разности давлений в зазоре и кожухе.

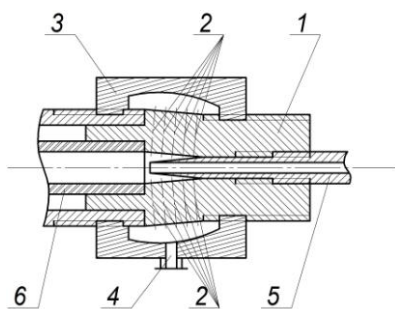


Рис. 1. Устройство для отвода диффузионного слоя

Особенностью данного аппарата является коническая форма внутренней поверхности корпуса, что позволяет создать значительный перепад давлений в зазоре между штоком и конусом и кожухом устройства, тем самым повысить количество отводимого диффузионного слоя.

Анализ показал, что производительность аппарата зависит от технологических (температура среды, давление в канале аппарата и скорость основного потока) и конструктивных параметров (удельная площадь отверстий корпуса, длина конусной части полого штока, расположение конусной части штока относительно отверстий).

Длина конусной части полого штока ограничена значениями от 6 до 14 мм, что обусловлено конструктивными особенностями кожуха.

Удельная площадь отверстий (ΔS) определяется по формуле

$$\Delta S = \frac{n \cdot S_{отв}}{S_{пов}}, \quad (1)$$

где n – количество отверстий; $S_{отв} = 1,77 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь одного отверстия; $S_{пов} = 175,3 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь внутренней поверхности конусной части корпуса.

Расположение конусной части штока относительно отверстий Δl варьировалось в диапазоне от 0 до 12 мм. При этом начальное положение штока – шток выдвинут в канал аппарата на 6 мм, конечное – шток погружен в корпус аппарата на 6 мм. На рис. 2 показан шток в среднем положении.

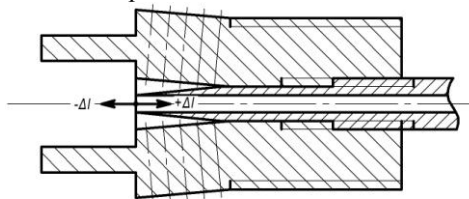


Рис. 2. Расположение штока относительно отверстий корпуса ($\Delta l = 6 \text{ мм}$)

Исследование проводилось на лабораторной установке периодического действия (рис. 3). В качестве исследуемого продукта использовалась молочная сыворотка с концентрацией сухих веществ 4 % масс. Основным элементом установки является мембранный аппарат 1, в который из емкости (бака) 2 подается исходный раствор сыворотки. В аппарате от раствора отделяется часть жидкости, профильтрованная через мембрану-фильтрат, который накапливается в баке 3. Наиболее концентрированная часть (диффузионный слой, отводимый с поверхности мембраны) попадает в бак 4, а оставшаяся часть основного потока с меньшей концентрацией возвращается в бак 1.

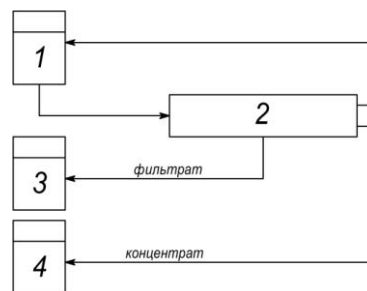


Рис. 3. Лабораторная установка периодического действия

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния длины конусной части штока на концентрацию отводимого диффузионного слоя представлены на рис. 4. Экспериментальные исследования проводили при рациональных значениях технологических параметров: температура среды 60 °С, давление в канале аппарата 0,2 МПа и скорость основного потока 1 м/с.

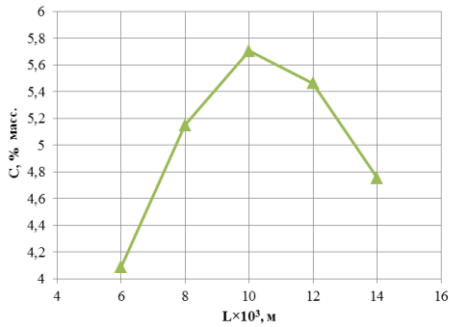


Рис. 4. Влияние длины конусной части штока на концентрацию отводимого диффузионного слоя ($P = 0,2$ МПа, $T = 60$ °С, $w = 1$ м/с)

Наибольшая концентрация $C = 5,7045$ % масс. достигается при $L = 10$ мм, что объясняется созданием максимальной разности давлений в зазоре между штоком и корпусом и кожухом, т.к. задействованы все кольцевые щели. При длине конусной части штока больше 10 мм наблюдается снижение разности давлений, а при L меньше 10 мм часть кольцевых щелей не участвует в отводе диффузионного слоя. Соответственно, в этих случаях наблюдается значительное понижение концентрации отводимого диффузионного слоя.

Результаты влияния удельной площади отверстий в корпусе на содержание сухих веществ в отводимом диффузионном слое представлены на рис. 5.

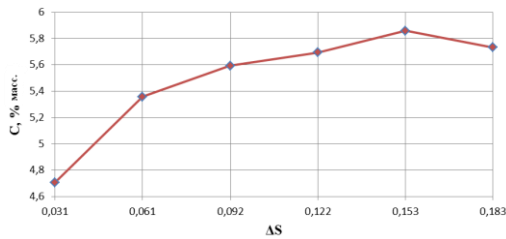


Рис. 5. Влияние удельной площади отверстий в корпусе на концентрацию отводимого диффузионного слоя ($P = 0,2$ МПа, $T = 60$ °С, $w = 1$ м/с)

Максимальное содержание растворенных веществ в концентрате продукта наблюдается при удельной площади отверстий 0,153 (15 отверстий в корпусе – 5 отверстий в 3 ряда). При уменьшении удельной площади отверстий снижается разность давлений в зазоре между штоком и корпусом, след-

ствие чего в корпус попадает лишь часть диффузионного слоя. Оставшаяся его часть удаляется с основным потоком, в связи с чем концентрация растворенных веществ снижается.

При возрастании удельной площади отверстий концентрация растворенных веществ также снижается, что вызвано снижением перепада давлений, как и в предыдущем случае. Кроме того, часть основного потока отводится вместе с диффузионным слоем.

Зависимость концентрации сухих веществ в диффузионном слое от расположения штока относительно отверстий представлена на рис. 6.

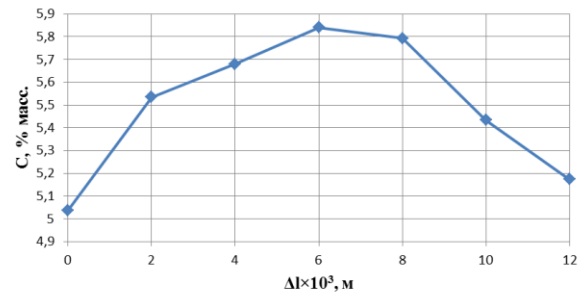


Рис. 6. Влияние расположения штока относительно отверстий на концентрацию отводимого диффузионного слоя ($P = 0,2$ МПа, $T = 60$ °С, $w = 1$ м/с)

При смещении штока в сторону мембраны происходит снижение концентрации за счет перекрытия части отверстий цилиндрической частью штока. Кроме того, фронтальная часть штока является местным сопротивлением потоку среды, турбулизирует его и размывает диффузионный слой. При смещении штока в обратном направлении часть отверстий корпуса не участвует в отводе диффузионного слоя, так как коническая часть штока не образует зазор с корпусом в данном месте. Таким образом, не создается необходимая разность давлений и концентрация падает.

Для построения регрессионной модели выбран активный эксперимент на основе матрицы планирования ортогонального плана второго порядка. В качестве факторов выбраны: длина конусной части штока L , удельная площадь отверстий в корпусе ΔS , расположение штока Δl . Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Обозначение факторов	Интервал варьирования	Факторы при уровнях варьирования				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
$X_1 (\Delta S), \text{м}^2/\text{м}^2$	0,05	0,03	0,06	0,1065	0,16	0,183
$X_2 (L), \text{мм}$	2,62	6	7,38	10	12,62	14
$X_3 (\Delta l), \text{мм}$	3,93	0	2,07	6	9,93	12

Эксперимент проводился на основе матрицы планирования (табл. 2) ортогонального плана второго порядка для трех факторов, составленной в

соответствии со стандартной методикой [4, 5].

Таблица 2

Матрица планирования
ортогонального плана второго порядка

№	$X_1, \text{ м}^2/\text{м}^2$	$X_2, \text{ мм}$	$X_3, \text{ мм}$	$Y, \% \text{ масс.}$
1	0,06	7,38	2,07	4,279
2	0,16	7,38	2,07	4,722
3	0,06	12,62	2,07	4,389
4	0,16	12,62	2,07	4,831
5	0,06	7,38	9,93	4,324
6	0,16	7,38	9,93	4,767
7	0,06	12,62	9,93	4,433
8	0,16	12,62	9,93	4,876
9	0,03	10	6	4,828
10	0,183	10	6	5,502
11	0,1065	6	6	4,048
12	0,1065	14	6	4,215
13	0,1065	10	0	5,06
14	0,1065	10	12	5,128
15	0,1065	10	6	5,659
16	0,1065	10	6	5,862
17	0,1065	10	6	5,627
18	0,1065	10	6	5,573
19	0,1065	10	6	5,684
20	0,1065	10	6	5,731

Была проведена проверка коэффициентов уравнения на значимость, а также проверка адекватности уравнения регрессии (табл. 3).

Таблица 3

Параметры регрессионного анализа

Параметр	Значение	
Безразмерные коэффициенты	b_0	5,685
	b'_0	4,977
	b_1	0,2211
	b_2	0,0547
	b_3	0,022
	b_{12}	$4,44 \cdot 10^{-16}$
	b_{13}	0
	b_{23}	$-8,9 \cdot 10^{-16}$
	b_{11}	-0,21455
	b_{22}	-0,6592
b_{33}	-0,245	
Дисперсия воспроизводимости	$S^2_{\text{восп}}$	0,01
	$f_{\text{восп}}$	5
Расчетный критерий Стьюдента	t_0	2532,748
	t_1	78,3483
	t_2	19,383
	t_3	7,8489
	t_{12}	$1,25 \cdot 10^{-13}$
	t_{13}	0
	t_{23}	$2,5 \cdot 10^{-13}$
	t_{11}	56,008
	t_{22}	172,0783
t_{33}	63,94	
Критический критерий Стьюдента	$t_{\text{кр}}$	2,57
Дисперсия адекватности	$S^2_{\text{ад}}$	0,00415
	$f_{\text{ад}}$	13
Критерий Фишера	$F_{\text{расч}}$	2,42
	$F_{\text{крит}}$	3

Незначимые коэффициенты исключены из уравнения. Адекватность уравнения подтверждена критерием Фишера ($F_{\text{крит}} = 3, F_{\text{расч}} = 2,42, F_{\text{крит}} > F_{\text{расч}}$).

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$C = -6,15 + 0,1954 \cdot \Delta l - 0,0158 \cdot \Delta l^2 + 22,7 \times \times \Delta S - 85,82 \cdot \Delta S^2 + 1,9366 \cdot L - 0,0958 \cdot L^2 \quad (2)$$

Задача определения значений конструктивных параметров, обеспечивающих максимально возможное содержание растворенных веществ в концентрате, сводится к определению максимума функции нескольких переменных.

Выводы

Для переработки молочных сред с целью получения полезных продуктов, обогащенных белковыми соединениями в нативном виде, актуально применение мембранных методов. Наиболее эффективны мембранные аппараты с отводом диффузионного слоя.

Проведено исследование влияния конструктивных параметров аппарата на процесс концентрирования молочной сыворотки.

На основе регрессионного анализа выявлены рациональные значения конструктивных параметров аппарата для концентрирования молочной сыворотки. Максимальное содержание растворенных веществ в концентрате наблюдается при удельной площади отверстий $\Delta S = 0,14$, расположении штока относительно отверстий $\Delta l = 6,22$ мм и длине конусной части штока $L = 10,12$ мм и составляет $C(\Delta S, \Delta l, L) = 5,6284$ % масс.

Список литературы

1. Лобасенко, Б.А. Процессы гидромеханического разделения пищевых сред / Б.А. Лобасенко, Ю.В. Космодемьянский. – Кемерово, 1999. – 103 с.
2. Брык, М.Т. Ультрафильтрация / М.Т. Брык, Е.А. Цапюк. – Киев: Наук. думка, 1989. – 289 с.
3. Храмцов, А.Г. Продукты из обезжиренного молока, пахты и молочной сыворотки / А.Г. Храмцов, Э.Ф. Кравченко, К.К. Петровский и др.; под ред. А.Г. Храмцова и П.Г. Нестеренко. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.
4. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: учеб. пособие для вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.
5. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985.
6. Пат. 2119378 Российская Федерация, МПК⁶ B01D61/14, B01D65/08. Аппарат для мембранного разделения / Лобасенко Б.А., Иванец В.Н., Космодемьянский Ю.В., Лопухинский Л.М.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 95122363/25; заявл. 23.12.95; опубл. 27.09.98.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.E. Timofeev, B.A. Lobasenko, R.V. Kotlyarov

**RESEARCH ON DESIGN PARAMETERS OF MEMBRANE APPARATUS
WITH DIFFUSION LAYER REMOVING**

The prospects of whey processing using membrane methods are dealt with. A membrane apparatus with the removing of the diffusion layer is proposed. The influence of design parameters on the efficiency of whey concentration is investigated. A regression analysis of this influence is carried out. The rational values of design parameters are revealed.

The membrane apparatus, the diffusion layer, concentrating, whey, design parameters, regression analysis.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

