

УДК 637.1:621.512.8

**А.С. Шушпанников, Б.А. Лобасенко, Р.В. Котляров****ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО АППАРАТА ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ  
ОБЕЗЖИРЕННОГО МОЛОКА**

Рассмотрены перспективы получения концентрата молочного белка мембранными методами. Обозначены преимущества ультрафильтрации при выделении белка по сравнению с типовыми процессами. Предложен мембранный аппарат с отводом диффузионного слоя. Исследовано влияние конструктивных и режимных параметров аппарата на эффективность ультрафильтрационного концентрирования обезжиренного молока. Проведен регрессионный анализ влияния конструктивных и режимных параметров на концентрацию сухих веществ в отводимом диффузионном слое. Определены рациональные значения конструктивных и режимных параметров, позволяющие обеспечить эффективность процесса мембранного концентрирования обезжиренного молока в ультрафильтрационном аппарате с отводом диффузионного слоя.

Мембранный аппарат, диффузионный слой, концентрирование, молочный белок, конструктивные параметры, режимные параметры, регрессионный анализ.

**Введение**

В настоящее время молочная промышленность испытывает дефицит молочного сырья. Это привело к тому, что повышенным спросом стал пользоваться концентрат молочного белка. Он находит всё более активное применение в производстве различной молочной и кисломолочной продукции. В отличие от использования других ингредиентов, концентрат молочного белка поддерживает натуральный вкус молока, обеспечивая прекрасные вкусовые качества готового продукта. Это стало одним из наиболее важных аргументов в пользу его применения, и на сегодняшний день он обретает всё большую популярность [1].

Среди методов концентрирования молочных белков в последние десятилетия особое внимание уделяется ультрафильтрации. Это обусловлено рядом преимуществ перед остальными способами концентрирования. К ним можно отнести: щадящий температурный режим; отсутствие фазовых превращений, за счет чего молочный белок не претерпевает изменений; сохранение натуральной формы и полезных свойств. По сравнению с другими способами концентрирования ультрафильтрация характеризуется меньшей энергоёмкостью, низкими эксплуатационными расходами и простотой обслуживания [2].

Однако недостатком этого метода, так же как и других мембранных процессов, является образование слоя с повышенным содержанием задерживаемых веществ на внутренней поверхности мембраны – так называемое явление концентрационной поляризации. Оно негативно влияет на производительность.

Одним из направлений развития мембранных технологий является разработка оборудования, способного использовать данное явление с позитивной стороны, что позволяет сохранять скорость процесса на достаточно высоком уровне [3].

**Объект и методы исследования**

В рамках данного направления предложен мембранный аппарат (рис. 1), который состоит из двух кожухов со штуцерами для отвода продукта, корпуса с отверстиями, в полости которого находится про-

точный подвижный полый шток переменной конфигурации. Особенностью данного аппарата является использование проточного подвижного штока переменной конфигурации и двух кожухов. Это позволяет отводить диффузионный слой из двух областей, что повышает его количество и концентрацию и, следовательно, производительность аппарата [4].

Устройство работает следующим образом. Исходный раствор под давлением подается по трубчатой мембране. Происходит мембранная фильтрация, при этом вследствие поляризации на внутренней поверхности мембраны образуется слой с повышенным содержанием растворенных веществ. Пристенная часть потока, включающая поляризационный слой, устремляется в зазор между штоком и стенкой корпуса аппарата, который делится на две области отвода, ограниченные снаружи двумя кожухами. В первой области концентрат с большим содержанием растворенных веществ за счет разности давлений между зазором и полостью первого кожуха через отверстия засасывается в кожух. Слой концентрата, не попавший в первый кожух, двигаясь дальше по внутренней поверхности корпуса, попадает во вторую область и через отверстия засасывается во второй кожух. Неотведенная часть пристенного потока через проточки в резьбовом креплении штока удаляется вместе с основным потоком, отводимым через центральный канал штока.

Анализ работы аппарата показал, что его производительность по концентрату зависит от технологических, режимных и конструктивных параметров. На первом этапе исследования была проведена оценка влияния конструктивных параметров аппарата на содержание сухих веществ в отводимом продукте. На втором этапе было установлено влияние режимных параметров на содержание растворенных веществ в отводимом продукте. В качестве исследуемого продукта использовалось восстановленное обезжиренное молоко с концентрацией сухих веществ 8 % масс.

Исследование проводилось на лабораторной установке, основным элементом которой является

мембранный аппарат, в который из бака подается исходный раствор. В качестве фильтрационного элемента аппарата использовались керамические мембранные фильтры КУФЭ-1 производства НПО «Керамикфильтр» на основе карбида кремния в виде трубки с наружным диаметром 10 мм, внутренним – 6 мм, длиной 250 мм и размером пор 25 нм. В аппарате от раствора отделяется и отводится в приемный бак часть жидкости, профильтрованной через мембрану (фильтрат). Пристенная часть потока отводится в приемный бак концентрата, а основной поток с меньшей концентрацией белка – в приемный бак ретентата.

Наибольшее влияние на производительность аппарата оказывают следующие конструктивные параметры:

1) положение начала конически расширяющейся части штока относительно переднего ряда отверстий первой области отвода ( $\Delta l_1$ );

2) положение начала конически сужающейся части штока относительно первого ряда отверстий второй области отвода ( $\Delta l_2$ );

3) удельная площадь отверстий корпуса во второй зоне отвода ( $\bar{S}$ ), определяемая по формуле:

$$\bar{S} = \frac{n \cdot S_{омв}}{S_{нов}}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество отверстий;  $S_{омв}$  – площадь одного отверстия,  $0,314 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $S_{нов}$  – площадь внутренней поверхности корпуса в зоне отвода второго кожуха,  $188,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Положение начала конически расширяющейся части штока относительно первого ряда отверстий первой области отвода варьировалось в диапазоне от  $-4,5$  до  $+4,5$  мм. Положение начала конически сужающейся части штока относительно первого ряда отверстий второй области отвода  $\Delta l_2$  варьировалось также в диапазоне от  $-4,5$  до  $+4,5$  мм.

Для исследования изменения концентрации продукта, отводимого из первой области, шток смещался в продольном направлении в интервале от  $\Delta l_1 = -4,5$  до  $\Delta l_1 = +4,5$  мм с шагом 1,5 мм. Предполагалось, что положение штока во второй области отвода не повлияет на концентрацию продукта отводимого из первой области, что подтвердилось в ходе эксперимента. Для исследования изменения концентрации продукта, отводимого из второй области, использовалось 7 штоков с разной длиной цилиндрической части, которая изменялась с шагом 1,5 мм. Штоки располагались так, чтобы положение конически расширяющейся части в первой области отвода оставалось неизменным. На рис. 1 показано устройство для отвода диффузионного слоя со штоком в положении  $\Delta l_1 = 0$  мм и  $\Delta l_2 = 0$  мм.

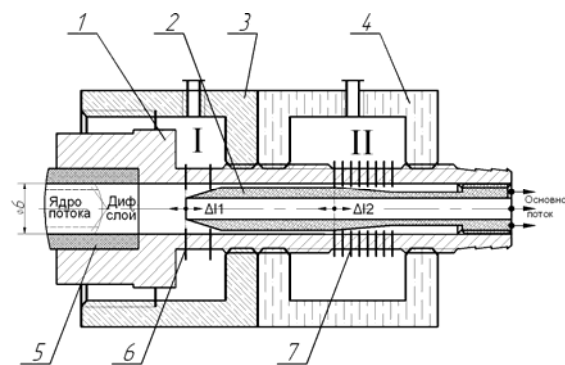


Рис. 1. Устройство для отвода диффузионного слоя: 1 – корпус; 2 – полый шток; 3 – первый кожух; 4 – второй кожух; 5 – керамическая мембрана; 6 – кольцевые отверстия корпуса первой области отвода; 7 – кольцевые отверстия корпуса второй области отвода; I – первая область отвода; II – вторая область отвода

Режимными параметрами, оказывающими влияние на содержание растворенных веществ в отводимом продукте, являются его расходы из первой и второй области, а также расход основного потока. Расход основного потока изменялся в диапазоне от  $6,6 \cdot 10^{-6}$  до  $13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , что соответствовало ламинарному режиму течения раствора в канале аппарата. Экспериментально доказано, что отношение расходов отводимого продукта и основного потока не должно превышать значения 1:10 [5], при большем соотношении диффузионный слой смешивается с основным потоком, что приводит к падению концентрации. В связи с этим был выбран диапазон изменения расходов продукта, отводимого из первой и второй области, от  $0,16 \cdot 10^{-6}$  до  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Отводить продукт из кожухов с расходом ниже  $0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  нецелесообразно ввиду малого объема, т.е. низкой производительности по концентрату.

### Результаты и их обсуждение

*Результаты влияния конструктивных параметров на содержание растворенных веществ в отводимом продукте.*

Результаты исследования влияния положения штока на концентрацию диффузионного слоя представлены на рис. 2. Здесь и далее кривые построены по средним значениям выборки полученных данных, пределы выборки также приведены. Экспериментальные исследования проводили при обоснованных ранее в [6, 7] значениях технологических параметров: температуре среды  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , давлении в канале аппарата  $0,15 \text{ МПа}$  и скорости основного потока  $0,4 \text{ м/с}$ .

Наибольшая концентрация растворенных веществ в продукте, отводимом из первой области, достигается при  $\Delta l_1 = -1,5$  мм.

При смещении штока в сторону, противоположную направлению потока, происходит снижение концентрации продукта за счет уменьшения зазора между корпусом и штоком, что приводит к уменьшению разности давлений между зазором и полостью первого кожуха. Обнаружено, что смещение штока в обратную сторону также негативно влияет на концентрацию продукта, отводимого из первой области.

Наибольшая концентрация растворенных веществ в продукте, отводимом из второй области, достигается при  $\Delta l_2 = 0$  мм. При смещении сужающейся части штока в сторону, противоположную направлению потока, происходит снижение концентрации продукта, отводимого из второй области, за счет того, что в отводе участвует значительная часть отверстий (большая удельная площадь отвода), и часть ядра потока отводится вместе с диффузионным слоем. Перемещение штока по направлению потока также приводит к снижению концентрации продукта, отводимого из второй области, за счет того, что часть отверстий не участвует в создании разности давлений в кожухе и в корпусе устройства, так как находится над цилиндрической частью штока.

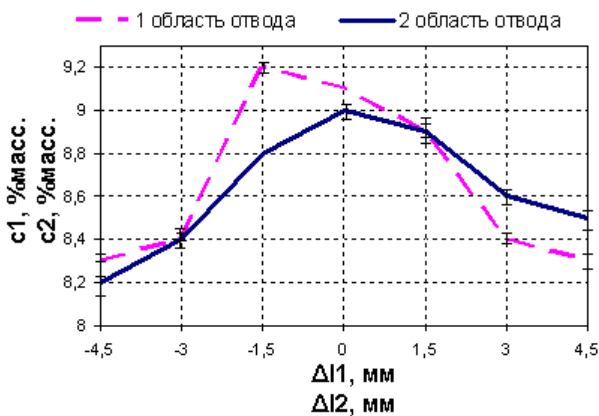


Рис. 2. Влияние положения штока относительно отверстий корпуса на концентрацию диффузионного слоя, отводимого из первой и из второй области ( $P = 0,15$  МПа,  $T = 20$  °С,  $w = 0,4$  м/с)

Результаты влияния удельной площади отверстий корпуса во второй области отвода на содержание растворенных веществ в диффузионном слое представлены на рис. 3.

Максимальное содержание растворенных веществ в отводимом продукте наблюдается при удельной площади отверстий корпуса во второй области отвода равной 0,0798 (48 отверстий в корпусе – 8 отверстий в 6 рядов). При уменьшении этой величины в зазор между штоком и стенкой попадает лишь часть диффузионного слоя. Оставшаяся его часть удаляется с основным потоком, что негативно влияет на концентрацию сухих веществ.

При возрастании удельной площади отверстий концентрация растворенных веществ также снижается, что вызвано снижением перепада давлений между внутренней полостью корпуса и полостью

второго кожуха. Кроме того, часть ядра потока дополнительно всасывается в зазор и отводится вместе с диффузионным слоем.

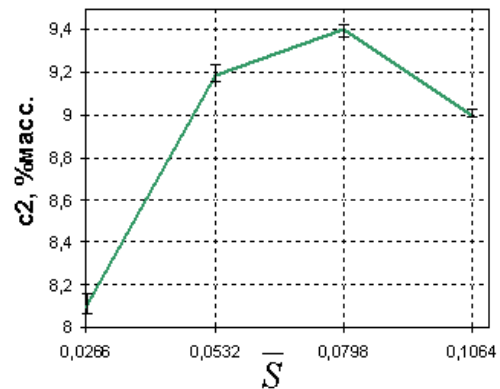


Рис. 3. Влияние удельной площади отверстий корпуса во второй области отвода на концентрацию отводимого из нее диффузионного слоя ( $P = 0,15$  МПа,  $T = 20$  °С,  $w = 0,4$  м/с)

Для построения регрессионной модели изменения концентрации продукта, отводимого из первой ( $C_1$ ) и из второй ( $C_2$ ) области отвода, в зависимости от конструктивных параметров проведены активные эксперименты на основе матриц планирования ортогонального плана второго порядка для трех факторов, составленных в соответствии со стандартной методикой [8]. Была проведена проверка коэффициентов уравнений на значимость, незначимые коэффициенты исключены из уравнений. Адекватность уравнений подтверждена оценкой по критерию Фишера ( $F_{крит1} = 4,1$ ;  $F_{расч1} = 3,4$ ;  $F_{крит1} > F_{расч1}$ ;  $F_{крит2} = 19,3$ ;  $F_{расч2} = 1,75$ ;  $F_{крит2} > F_{расч2}$ ).

Уравнения регрессий в натуральном масштабе имеют вид:

$$C_1 = 8,969 + 0,0786 \cdot \Delta l_1 + 0,0062 \cdot \Delta l_2 + 0,0094 \cdot \Delta S - 0,0085 \cdot \Delta l_1^2 - 0,0007 \cdot \Delta l_2^2 - 0,0009 \cdot \bar{S}^2, \quad (2)$$

$$C_2 = 8,6143 - 0,0086 \cdot \Delta l_1 + 0,0574 \cdot \Delta l_2 + 0,0818 \cdot \Delta S + 0,0009 \cdot \Delta l_1^2 - 0,0063 \cdot \Delta l_2^2 - 0,0062 \cdot \bar{S}^2. \quad (3)$$

В результате анализа уравнений регрессии (2, 3) выявлены рациональные значения конструктивных параметров описанного устройства. Максимальное содержание растворенных веществ в отводимом продукте наблюдается, когда положение штока относительно отверстий первой области отвода составляет  $\Delta l_1 = -2,19$  мм, положение штока относительно отверстий второй области отвода  $\Delta l_2 = 0,18$  мм, а удельная площадь отверстий во второй области –  $\bar{S} = 0,0758$ . При этом концентрации равны соответственно  $C_1 = 9,18$  %масс. и  $C_2 = 9,01$  %масс.

Результаты влияния режимных параметров на содержание сухих веществ в отводимом продукте.

Результаты исследования влияния расхода продукта, отводимого из первой области, и объема основного потока на концентрацию сухих веществ в продукте представлены на рис. 4. Экспериментальные исследования проводили при выбранных технологических и рациональных конструктивных параметрах, установленных выше.

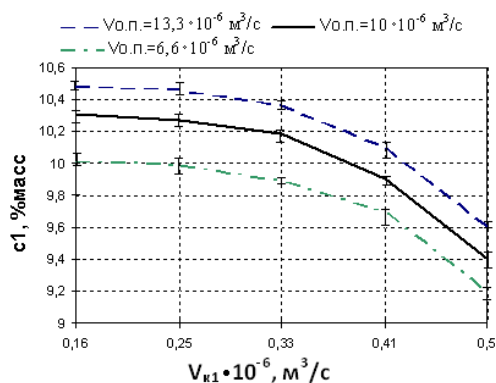


Рис. 4. Зависимость концентрации продукта, отводимого из первой области, от его расхода и объема основного потока ( $P = 0,15$  МПа,  $T = 20$  °С,  $w = 0,4$  м/с,  $\Delta l_1 = 2,31$  мм,  $\Delta l_2 = 4,5$  мм,  $\bar{S} = 0,0758$ )

Как видно из рис. 4, наибольшая концентрация растворенных веществ в продукте, отводимом из первой области, наблюдается при расходе  $V_{к1} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и величине основного потока  $V_{о.п.} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , что соответствует ламинарному течению жидкости ( $Re = 2300$ ). Уменьшение расхода основного потока приводит к снижению концентрации отводимого продукта, что обусловлено, по нашему мнению, возникающим подсосом раствора из ядра потока в зазор.

При увеличении расхода продукта из второй области происходит аналогичное явление, что также приводит к постепенному снижению концентрации.

Результаты исследования влияния суммарного расхода отводимого раствора на концентрацию растворенных веществ в продукте, отводимом из второй области, представлены на рис. 5. Экспериментальные исследования проводили при выбранных технологических и рациональных конструктивных параметрах.

Как следует из рис. 5, наибольшая концентрация растворенных веществ в продукте, отводимом из второй области, достигается при значениях  $V_{к2} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $V_{к1} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . При увеличении  $V_{к2}$  происходит снижение концентрации за счет попадания в зазор и затем в кожух увеличенной части ядра потока. При увеличении  $V_{к1}$  также происходит снижение концентрации продукта, так как основная часть диффузионного слоя отводится в первой области.

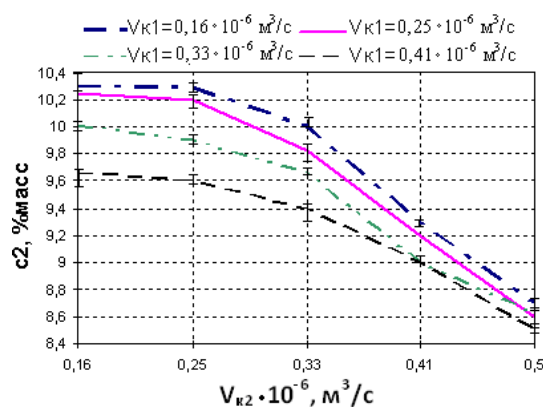


Рис. 5. Зависимость концентрации продукта, отводимого из второй области, от суммарного расхода диффузионного слоя ( $P = 0,15$  МПа,  $T = 20$  °С,  $w = 0,4$  м/с,  $\Delta l_1 = 2,31$  мм,  $\Delta l_2 = 4,5$  мм,  $\bar{S} = 0,0758$ )

Для построения регрессионной модели изменения концентрации продукта, отводимого из первой ( $C_1$ ) и из второй ( $C_2$ ) области, в зависимости от режимных параметров проведены активные эксперименты на основе матриц планирования ортогонального плана второго порядка для трех факторов, составленного в соответствии со стандартной методикой [8]. Была проведена проверка коэффициентов уравнений на значимость, незначимые коэффициенты исключены из уравнений. Адекватность уравнений подтверждена оценкой по критерию Фишера ( $F_{крит1} = 19,4$ ;  $F_{расч1} = 13,6$ ;  $F_{крит1} > F_{расч1}$ ;  $F_{крит2} = 19,4$ ;  $F_{расч2} = 1,28$ ;  $F_{крит2} > F_{расч2}$ ).

Уравнения регрессий в натуральном масштабе имеют вид:

$$C_1 = 9,4032 + 0,00625 \cdot V_{к1} - 0,011 \cdot V_{к2} + 0,0022 \cdot V_{о.п.} - 0,0007 \cdot V_{к1}^2 + 0,0002 \cdot V_{к2}^2, \quad (4)$$

$$C_2 = 9,039 + 0,0046 \cdot V_{к1} - 0,0169 \cdot V_{к2} + 0,0028 \cdot V_{о.п.} - 0,0003 \cdot V_{к1}^2. \quad (5)$$

В результате анализа уравнения регрессии (4, 5) выявлены рациональные значения режимных параметров при концентрировании обезжиренного молока. Максимальное содержание растворенных веществ в отводимом продукте наблюдается при величине объемного расхода основного потока  $V_{о.п.} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Расходы из первой и второй области отвода составляют  $V_{к1} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $V_{к2} = 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , а концентрация  $C_1 = 10,48$  %масс.,  $C_2 = 10,25$  % масс. соответственно.



## Список литературы

1. Молочные белки // Protein-ingredients.ru: сайт ООО «Протеиновые ингредиенты». – URL: <http://protein-ingredients.ru/molochnie-belki> (дата обращения: 30.05.2013).
2. Установки получения сывороточных белков и сахаров // Me-system.ru: сайт компании «Membrane Engineering Systems». – URL: <http://me-system.ru/установки-получения-сывороточных-белков/> (дата обращения: 29.05.2013).
3. Лобасенко, Б.А. Ультрафильтрация молока и молочных продуктов / Б.А. Лобасенко, Р.Б. Лобасенко. – Кемерово, 2006. – 117 с.
4. Заявка 2012138966/20 Российская Федерация, МПК ВО1D63/06. Аппарат для мембранного концентрирования / Лобасенко Б.А., Шушпанников А.С., Семенов А.Г., Захаров Ю.Н. – Заявл. 11.09.2012.
5. Пашкевич, А.А. Разработка и исследование мембранного аппарата с постоянным отводом диффузионного слоя для концентрирования обезжиренного молока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Пашкевич А.А. – Кемерово, 2012.
6. Сафонов, А.А. Разработка и внедрение мембранного аппарата с комбинированным отводом слоя: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Сафонов А.А. – Кемерово, 2004.
7. Котляров, Р.В. Моделирование процесса мембранного концентрирования молочных сред и разработка аппаратных схем установок: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Котляров Р.В. – Кемерово, 2009.
8. Шевцова, Т.Г. Моделирование объектов и систем управления / Т.Г. Шевцова. – Кемерово, 1998. – 68 с.

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.S. Shushpannikov, B.A. Lobasenko, R.V. Kotlyarov

**RESEARCH ON DESIGN AND OPERATION PARAMETERS OF ULTRAFILTRATION APPARATUS FOR SKIMMED MILK CONCENTRATION**

The prospects of milk protein concentration with membrane methods are reviewed. Advantages of ultrafiltration at protein separation in comparison with standard processes are designated. A membrane apparatus with a removing of the diffusion layer is proposed. The influence of design and operation parameters on the efficiency of ultrafiltrational concentration of skimmed milk is studied. A regression analysis of the design and operation parameters influence on the concentration of solids in removed diffusion layer has been carried out. The rational values of design and operation parameters providing the efficiency of membrane concentration process of skimmed milk in the ultrafiltration apparatus with a removing of the diffusion layer have been defined.

The membrane apparatus, the diffusion layer, concentration, milk protein, design parameters, operation 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

*Дата поступления: 01.07.2013*

