

*Е.В. Беспалова, к.т.н., доцент, А.Д. Белокобылова, А.С. Кадыгроб,  
А.Н. Польшин, Е.Д. Шегидевич  
Институт мясо-молочной промышленности, Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН НА ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ МОЛОЧНОГО И СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ**

*E. Bepalova, A. Belokobylova, A. Kadygrob, A. Polyn, E. Shegidevich  
Institute of Meat and Dairy Industry, Minsk, Republic of Belarus*

## **EFFECT OF ULTRAFILTRATION MEMBRANE MATERIAL ON FRACTIONATION**

*e-mail: bepalova-kat@mail.ru, nastya.belokobylova@mail.ru*

*В статье представлено влияние мембранных материалов на эффективность извлечения сывороточного и молочного белка в процессе ультрафильтрации. Данная работа подчеркивает необходимость оптимизации мембранных технологий для достижения максимального качества и производительности в производстве белковых ингредиентов, что открывает широкие перспективы для пищевой промышленности.*

*This article presents the effect of membrane materials on the efficiency of serum and milk protein extraction during ultrafiltration. This work emphasizes the need to optimize membrane technologies to achieve maximum quality and productivity in the production of protein ingredients, which opens up wide prospects for the food industry.*

**Ключевые слова:** мембраны, мембранные элементы, концентрат молочного белка, концентрат сывороточного белка, пермеат, молоко обезжиренное, сыворотка молочная.

**Keywords:** membranes, membrane elements, milk protein concentrate, whey protein concentrate, permeate, nonfat milk, whey.

**Введение.** В настоящее время мембранные процессы находят широкое применение в молочной промышленности для фракционирования молочного сырья. Использование мембранных методов позволяет по-новому решать вопросы молокопереработки и открывает широкие возможности при разработке новых видов продуктов питания. Применяемые методы мембранного концентрирования обеспечивают получение белковых компонентов, технологичность производства и качество которых зависит от нескольких факторов, в частности и от материала мембранного элемента. Полупроницаемые мембраны являются главным элементом всех мембранных аппаратов. Для изготовления мембранных фильтров применяют самые разные материалы, причем некоторые типы мембран изготавливают только из одного материала, а другие типы состоят из различных материалов. К основным мембранным материалам относятся: полиакрилонитрил (ПАН); ацетат- и регенерированная целлюлоза (АЦ, РЦ); полисульфоны (полисульфон, полиэфирсульфон); полиамид (ПА); полипропилен (ПП) и другие. Таким образом, актуальным является проведение комплекса работ по установлению технологических подходов к ультрафильтрации обезжиренного молока и сыворотки молочной для выделения концентрата молочного белка (КМБ) и концентрата сывороточных белков (КСБ).

**Материалы и методы исследований.** При выполнении научно-исследовательской работы применялись статистический и аналитический методы, системный анализ и обобщение данных источников научной литературы, аналитической информации по вопросам переработки молочного сырья.

Определение характеристик объектов исследований проводилось с использованием стандартных методов. Массовая доля сухих веществ определялась гравиметрическим и рефрактометрическим методами с использованием рефрактометра марки AQUA-LAB, массовая доля белка – рефрактометрическим методом ГОСТ 25179 с использованием центрифуги лабораторной ЦЛМ 1-12, активная кислотность по рН-метру, титруемая кислотность – методом щелочного титрования 0,1н гидроксидом натрия. Масса сырья нормализованных смесей определялась взвешиванием на технических весах ВК-3000, ВСП-150/20-5С.1 в соответствии с руководством по их эксплуатации.

Отработка оптимальных технологических параметров процесса ультрафильтрации осуществлялась в условиях лаборатории оборудования и технологий молочноконсервного производства Отраслевой лаборатории биохимии, микробиологии и технологических процессов переработки молока РУП «Институт мясо-молочной промышленности».

**Результаты и их обсуждение.** Современные тенденции развития пищевой индустрии определяют новый взгляд на молоко как сырье для получения широкого ассортимента ингредиентов с различными функционально-технологическими свойствами. Молочные ингредиенты привлекают особое внимание в Беларуси и мире в целом, что формирует прогнозируемый среднегодовой рост объема мирового рынка 8,4 % (согласно данным Data Bridge Market Research). Наибольшую долю всех молочных ингредиентов занимают белковые.

Концентраты сывороточного белка (КСБ), получаемые путем ультрафильтрации молочной сыворотки, отлично загустевают, пенятся и восстанавливаются после высушивания. За счет удаления небелковых веществ готовый продукт содержит не менее 25 % белка в сухом веществе. В зависимости от используемых технологических приемов сывороточные белки вырабатываются в виде концентратов, изолятов и гидролизатов. По сравнению с изолятами концентраты имеют более высокое содержание жира и лактозы, биологически активных соединений. В настоящее время эти нативные сывороточные белки широко используются в питании людей в качестве неотъемлемого компонента продуктов спортивного и детского питания.

Концентраты молочного белка (КМБ) – продукты, получаемые путем фракционирования молока методом ультрафильтрации. КМБ производят из обезжиренного молока, поэтому содержание жира составляет менее 3 %, белковой фракции в сухом веществе – от 42 до 85 %. Количество небелковых компонентов КМБ корректируется путем дополнительного использования процессов диафильтрации и микрофильтрации. При этом содержание зольного остатка в продукте остается довольно высоким, поскольку белки мицелл казеина, организованные в виде надмолекулярных динамических структур, включают значительное количество коллоидного фосфата кальция. Изоляты молочных белков (ИМБ) содержат около 90 % белка в сухом веществе. Соотношение казеина и сывороточных белков и в КМБ, и ИМБ остается таким же, как в молоке (80:20). КМБ используется в качестве молочных ингредиентов в пищевых продуктах, в том числе: молочные продукты (йогурты, сыры, мороженое); кондитерские изделия, шоколад; готовые напитки; растворимые напитки, продукты с высоким содержанием белка; детское, лечебное и спортивное питание; продукты для контроля веса; выпечка, десерты; порошковые диетические добавки; культивированные продукты [1–6].

Применяемые методы мембранного концентрирования обеспечивают получение белковых компонентов, технологичность производства и качество которых зависит от нескольких факторов, в частности и от материала мембранного элемента. В настоящее время 80 % мирового рынка мембранных элементов – полимерные.

Разнообразие их огромно. Свойства элементов во многом определяются свойствами полимеров, из которых они изготовлены [7, 8].

На мировом рынке ключевые крупные игроки-производители ультрафильтрационных модулей: Koch Separation Solutions, Alfa Laval, Dupont, Pall Corporation, Synder Filtration, АО «РМ Нанотех» и другие. В нашей стране отсутствует массовое производство, однако проводятся научные исследования совместно с ГНУ «Институт физико-органической химии» НАН Беларуси по разработке отечественных ультрафильтрационных мембранных элементов с различным номинальным молекулярно-массовым пределом отсечения (НММПО) из полимерных материалов, предназначенных для извлечения концентратов сывороточных (КСБ) и молочных (КМБ) белков из молочного сырья. В этой связи актуальным является установление влияния характеристик ультрафильтрационных мембран на качественные показатели ретентата и пермеата молочного сырья, на основании которых будут разработаны отечественные мембранные элементы для поставленных целей.

Фракционирование обезжиренного молока и молочной сыворотки лабораторными ультрафильтрационными мембранами осуществлялось с использованием лабораторной установки, состоящей из фильтрационной ячейки, магнитной мешалки ММ-135 (Tagler, LabTechnology), компрессора Fini Ciao/25, с помощью которого создается давление в системе, контроль обеспечивается манометром МОИ-10-1. Исследованы мембраны из различных полимерных материалов: полиэфирсульфона (ПЭС), полисульфона (ПС) и регенерированной целлюлозы (РЦ) с НММПО от 10 до 30 кДа. Ультрафильтрация подготовленного молочного сырья (обезжиренного молока, сыворотки творожной, сыворотки подсырной) проводилась при температуре  $(16 \pm 2)^\circ\text{C}$ , при трансмембранном давлении 0,2 МПа до максимально достигаемого предела концентрирования по сухим веществам. В результате исследования полученных ретентата и пермеата по степени концентрирования сухих веществ, белка, переходу белка в пермеат (потерям) и его фракционному составу (казеин, сывороточные белки), изменению минерального профиля проведена оценка эффективности работы мембран.

В процессе ультрафильтрации на полиэфирсульфоновых мембранах наибольший фактор концентрирования по сухим веществам при обработке обезжиренного молока достигнут при обработке на мембране ПЭС-10 (НММПО 10 кДа). Однако при фракционировании с помощью мембраны ПЭС-22 (НММПО 20 кДа) достигается наибольшая эффективность по степени концентрирования белка. Соотношения фактора концентрирования по сухим веществам к фактору по белку составляет 1:1,43 для ПЭС-10 и 1:2,22 для ПЭС-22. Такая же зависимость определена и при концентрировании сывороточных белков из творожной и подсырной сыворотки. Соотношения факторов равны 1:1,32 и 1:2,43 для творожной сыворотки и 1:3,1 и 1:4,2 для подсырной сыворотки соответственно. Еще одним доказательством эффективности мембраны с НММПО 20 кДа служат меньшие потери белка с сухими веществами в пермеат (6 % от сухого вещества для обработки обезжиренного молока и 8,6 % – для подсырной сыворотки).

Полисульфоновые мембраны для получения концентратов на основе обезжиренного молока и творожной сыворотки не показали свою эффективность, что определено по превышению степени концентрирования сухих веществ над степенью концентрирования белка. Кроме того, наблюдаются потери белка в пермеат, которые по обезжиренному молоку достигают 37,5 % в сухом веществе. Отмечена положительная динамика при концентрировании сывороточных белков из подсырной сыворотки. На каждую степень концентрирования сухих веществ получено 1,7 степени концентрирования белка. Переход белка в пермеат находится в допустимых пределах.

В процессе ультрафильтрации на целлюлозных мембранах (РЦ) наибольший фактор концентрирования по сухим веществам и белку достигнут на мембране РЦ-20 (с НММПО 20 кДа). Определено, что концентрирование белков молока и сыворотки с использованием данной мембраны обеспечивает соотношение степеней концентрирования сухих веществ и белка равные 1:(1,7-2,7). Исследования состава пермеата, полученного с использованием лабораторной мембраны РЦ-20, показали потерю белка 2,7 % в сухом веществе при обработке подсырной и творожной сывороток и 15,9 % в сухом веществе при обработке обезжиренного молока.

Исследования соотношения фракций белка при получении концентрата молочного белка представлены на рисунке 1.

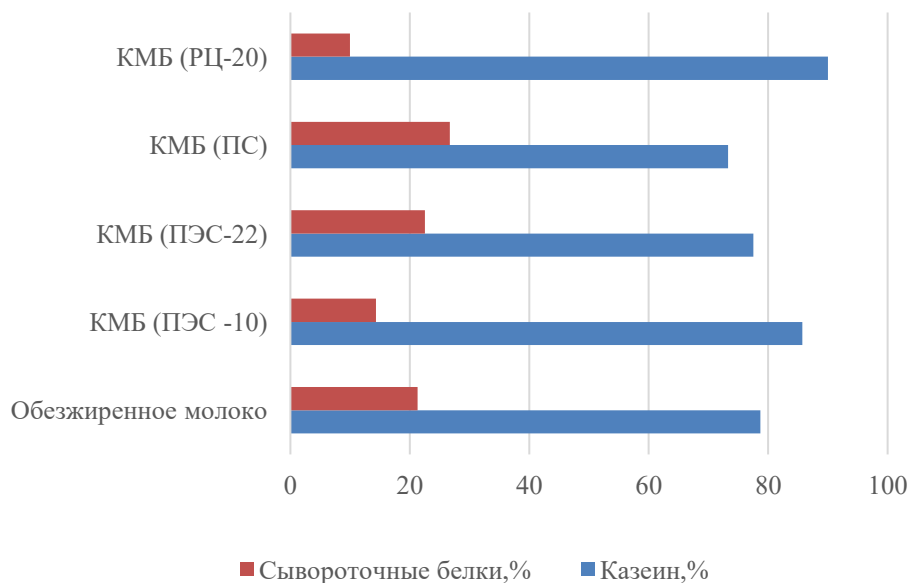


Рисунок 1 – Соотношение казеина и сывороточных белков в КМБ, полученных с помощью ультрафильтрации

Источник данных: собственная разработка.

Сравнение соотношений основных фракций белка в концентратах молочного белка показало, что концентрирование мембраной ПЭС-22 максимально сохраняет баланс между казеином и сывороточными белками. Применение мембраны ПЭС-10 и РЦ-20 способствует некоторому увеличению казеиновой фракции, что связано с большим переходом сывороточных белков в пермеат по сравнению с работой остальных исследуемых мембран по причине различных молекулярных весов и размеров их отдельных фракций, а также селективности самой мембраны.

Исследован минеральный профиль концентратов и пермеатов после ультрафильтрационной обработки на лабораторной установке обезжиренного молока (рисунок 2).

Установлено, что при ультрафильтрации обезжиренного молока на полимерных мембранах переход кальция в пермеат составил 25,7 %, магния – 52,9 %, калия – 84,8 %, натрия – 63,1 %, фосфора – 99,6 %; на мембране ПС переход кальция составил 59,2 %, магния – 86,1 %, калия – 100,0 %, натрия – 74,6 %, фосфора – 96,6 %; на мембране ПЭС-10 переход кальция составил 36,1 %, магния – 58,3 %, калия – 91,3 %, натрия – 93,5 %, фосфора – 95,4 %; а на мембране ПЭС-22 переход кальция – 27,0 %, магния – 55,8 %, калия – 96,3 %, натрия – 70,0 %, фосфора – 98,9 %.

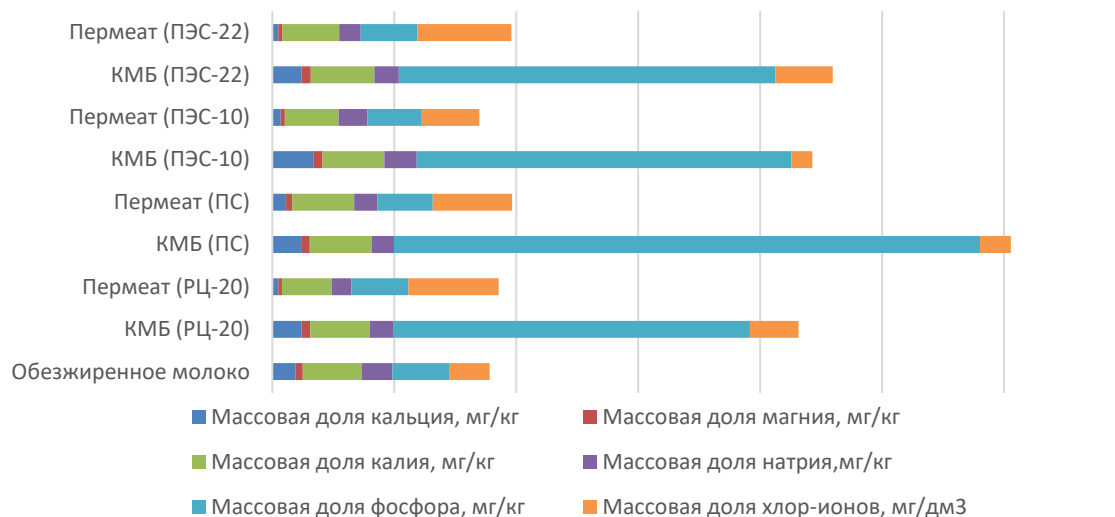


Рисунок 2 – Показатели изменения минерального профиля в процессе ультрафильтрации на полимерных мембранах обезжиренного молока  
 Источник данных: собственная разработка.

Минеральный профиль концентратов и пермеатов после ультрафильтрационной обработки на лабораторной установке сыворотки подсырной представлен на рисунке 3.

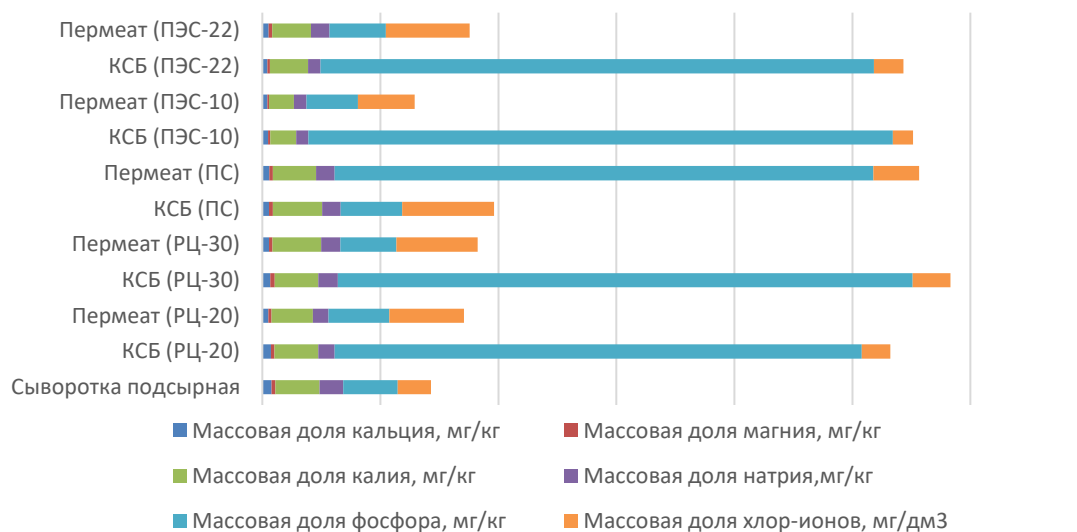


Рисунок 3 – Показатели изменения минерального профиля в процессе ультрафильтрации на полимерных мембранах подсырной сыворотки  
 Источник данных: собственная разработка.

В результате исследований установлено, что при ультрафильтрации сыворотки подсырной на полимерных мембранах на мембране РЦ-20 переход кальция в пермеат составил 67,1 %, магния – 78,6 %, калия – 93,6 %, натрия – 65,7 %, фосфора – 100 %, на мембране РЦ-30 переход кальция – 71,6 %, магния – 94,8 %, калия – 110 %, натрия – 80,6 %, фосфора – 100 %, на мембране ПС переход кальция – 75,5 %, магния – 98,4 %, калия – 97,7 %, натрия – 77,3 %, фосфора – 100 %, на мембране ПЭС-10 переход кальция – 53,6 %, магния – 45,0 %, калия – 56,7 %, натрия – 52,3 %, фосфора – 94,7 %, а на мембране ПЭС-22 переход кальция – 70,3 %, магния – 87,0 %, калия – 87,9 %, натрия – 77,5 %, фосфора – 100 %.

Минеральный профиль концентратов и пермеатов после ультрафильтрационной обработки на лабораторной установке сыворотки творожной представлен на рисунке 4.

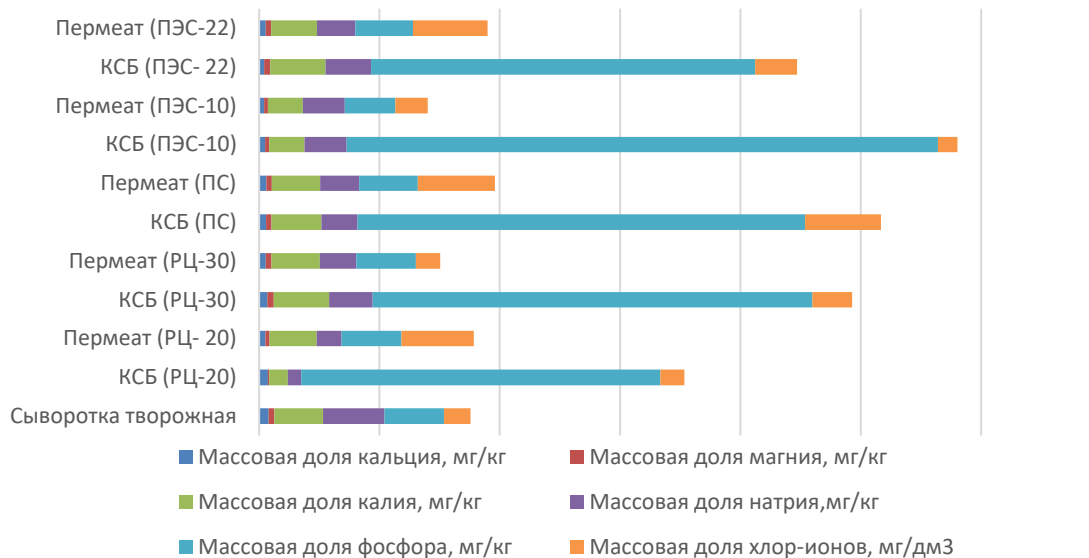


Рисунок 4 – Показатели изменения минерального профиля в процессе ультрафильтрации на полимерных мембранах творожной сыворотки  
Источник данных: собственная разработка.

В результате исследований минерального профиля концентратов и пермеатов после ультрафильтрационной обработки установлено, что при ультрафильтрации сыворотки творожной на полимерных мембранах на мембране РЦ-20 переход кальция в пермеат составил 35,4 %, магния – 72,2 %, калия – 96,9 %, натрия – 40,7 %, фосфора – 100,0 %, на мембране РЦ-30 переход кальция – 74,4 %, магния – 93,4 %, калия – 99,7 %, натрия – 59,2 %, фосфора – 100,0 %, на мембране ПС переход кальция – 71,0 %, магния – 96,5 %, калия – 99,8 %, натрия – 63,4 %, фосфора – 98,1 %, на мембране ПЭС-10 переход кальция – 75,4 %, магния – 65,6 %, калия – 71,9 %, натрия – 67,9 %, фосфора – 84,5 %, а на мембране ПЭС-22 переход кальция – 69,5 %, магния – 95,4 %, калия – 93,9 %, натрия – 62,2 %, фосфора – 96,9 %.

Таким образом, из полученных результатов следует, что для осуществления дальнейших исследований получения концентратов молочного белка из обезжиренного молока соответствующих показателей качества возможно использование ультрафильтрационных мембранных элементов на основе мембран из полиэфирсульфона с НММПО 20 кДа (ПЭС-22) и регенерированной целлюлозы с НММПО 20 кДа (РЦ-20). Для получения концентратов сывороточных белков – мембран из полиэфирсульфона с НММПО 20 кДа (ПЭС-22) и регенерированной целлюлозы с НММПО 20 и 30 кДа (РЦ-20, РЦ-30).

Исходя из этих данных, для дальнейших исследований и отработки технологических параметров были изготовлены опытные ультрафильтрационные мембранные элементы (изготовитель и собственник мембран ГНУ «Институт физико-органической химии» НАН Беларуси): на основе регенерированной целлюлозы (РЦ-20(1) и РЦ-20(2)) и полиэфирсульфона (ПЭС-20).

Процесс ультрафильтрации осуществлялся с использованием лабораторной установки Я23-ОУФ, изготовитель и собственник лабораторной установки РУП «Институт мясо-молочной промышленности». Для обеспечения сопоставимости результатов и формирования объективных данных для сравнения, ультрафильтрации

подвергались равные объёмы исходного сырья — обезжиренного молока и подсырной сыворотки. Контроль технологического процесса осуществлялся по ключевым физико-химическим показателям: массовая доля сухих веществ, массовая доля белка, титруемая кислотность и удельная электропроводность.

При обработке обезжиренного молока мембранный элемент ПЭС-20 продемонстрировал высокое соотношение факторов концентрирования по сухим веществам к белку (1:1,63). Элемент обеспечил получение концентрата с содержанием белка в сухом веществе 61,47 %. Процесс характеризовался интенсивным снижением электропроводности (на 0,10 мСм/см на каждый 1 % СВ) и значительным ростом титруемой кислотности (на 3,42 °Т на 1 % СВ). Мембранный элемент РЦ-20(1) показал схожие с ПЭС-20 характеристики. На каждый 1 % сухих веществ удельная электропроводность снижалась на 0,085 мСм/см, а титруемая кислотность увеличивалась на 2,06 °Т. С использованием мембранного элемента РЦ-20(2) достигнуто наивысшее среди отечественных аналогов соотношение факторов концентрирования (1:1,7) и массовой доли белка в сухом веществе концентрата (67,53 %).

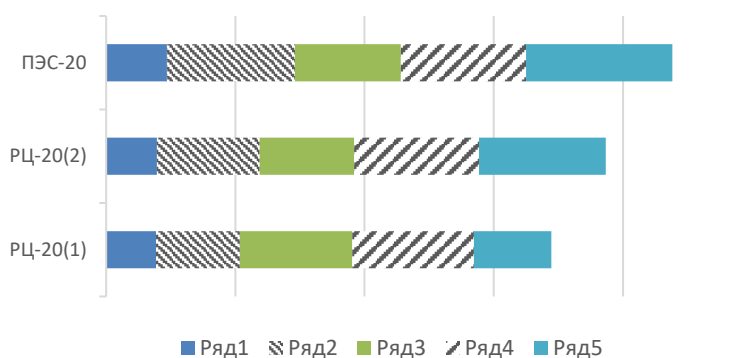


Рисунок 5 – Показатели изменения минерального профиля в процессе ультрафильтрации обезжиренного молока на различных мембранных элементах

Источник данных: собственная разработка.

На основании проведённых исследований ультрафильтрации обезжиренного молока с использованием трёх типов мембранных элементов (РЦ-20(1), РЦ-20(2) и ПЭС-20) установлены количественные показатели перехода минеральных солей в пермеат. Переход солей в пермеат для мембраны РЦ-20(1) составил: кальция – 38,6 %, магния – 64,8 %, калия – 87,2 %, натрия – 94,1 %, фосфора – 59,78 %. Для мембраны РЦ-20(2) данные показатели составили: кальция – 39,3 %, магния – 79,7 %, калия – 72,9 %, натрия – 96,8 %, фосфора – 98,1 %. Для мембраны ПЭС-20 зафиксирован переход: кальция – 47,0 %, магния – 99,2 %, калия – 82,0 %, натрия – 96,7 %, фосфора – 113,3 %.

При ультрафильтрации сыворотки подсырной мембранный элемент РЦ-20(1) продемонстрировал соотношение факторов концентрирования по сухим веществам к белку (1:3,37). Использование данного элемента позволило получить концентрат с содержанием белка в сухом веществе – 68,70 %. Процесс характеризовался значительным снижением удельной электропроводности – на 0,10 мСм/см на каждый 1 % прироста сухих веществ, что свидетельствует об эффективной деминерализации. Результативность концентрирования белковой фракции обеспечил мембранный элемент РЦ-20(2), фактор концентрирования по белку для которого достиг 12,4. Данный результат соответствует предельному соотношению факторов концентрирования (1:4,51) среди всех исследованных элементов. Одновременно с

этим было зафиксировано минимальное количество сухих веществ, перешедших в пермеат, со средним значением 3,45 %.

Применение мембранного элемента ПЭС-20 характеризовалось наименьшими показателями эффективности концентрирования: фактор концентрирования по белку составил 5,89, а массовая доля белка в сухом веществе конечного продукта – 47,32 %. Динамика процесса для данного элемента отличалась снижением удельной электропроводности на 0,06 мСм/см на каждый 1 % сухих веществ и максимальным приростом титруемой кислотности – 3,1 °Т на 1 %.

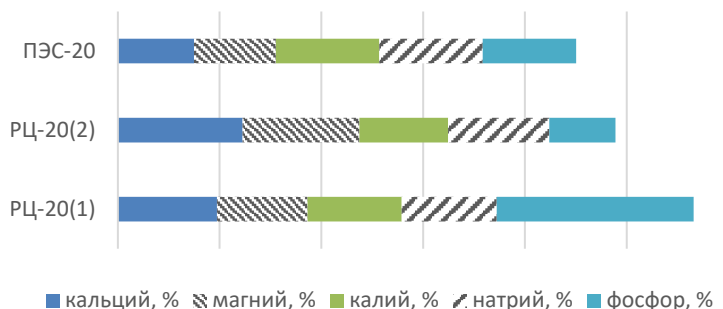


Рисунок 6 – Показатели изменения минерального профиля в процессе ультрафильтрации сыворотки подсырной на различных мембранных элементах

Источник данных: собственная разработка.

При ультрафильтрации сыворотки подсырной переход солей в пермеат для мембраны РЦ-20(1) составил: кальция – 97,5 %, магния – 88,8 %, калия – 92,5 %, натрия – 93,4 %, фосфора – 193,78 %. Для мембраны РЦ-20(2) данные показатели составили: кальция – 122,4 %, магния – 114,9 %, калия – 87,3 %, натрия – 99,3 %, фосфора – 65,3 %. Для мембраны ПЭС-20 зафиксирован переход: кальция – 74,6 %, магния – 80,6 %, калия – 101,6 %, натрия – 101,8 %, фосфора – 91,7 %.

Таким образом, из полученных результатов следует, что применение мембранных элементов на основе регенерированной целлюлозы (РЦ-20(1) и РЦ-20(2)) и полиэфирсульфона (ПЭС-20) позволило получить из обезжиренного молока и подсырной сыворотки белковые концентраты, соответствующие целевым показателям качества. Результаты подтвердили эффективность обеих испытанных мембранных элементов в процессе ультрафильтрации.

**Выводы.** Для получения концентратов молочного белка из обезжиренного молока и концентратов сывороточных белков из молочной сыворотки определена перспектива использования мембранных элементов отечественного производства, изготовленных на основе полиэфирсульфона и регенерированной целлюлозы.

### Список использованных источников

1. Шегидевич, Е. Д. Тенденция получения белковых ингредиентов путем глубокого разделения молочного сырья / Е. Д. Шегидевич, Е. В. Беспалова // Молочная река. Ежеквартальный журнал для профессионалов. – 2024. – № 2(94). – С. 28–32.

1. Shegidevich, Ye. D. Tendentsiya polucheniya belkovykh ingrediyyentov putem glubokogo razdeleniya molochnogo syr'ya [The tendency to obtain protein ingredients by deep separation of dairy raw materials] / Ye. D. Shegidevich, Ye. V. Bepalova // Molochnaya reka. Yezhekvar'tal'nyy zhurnal dlya professionalov. – 2024. – № 2(94). – S. 28–32.

2. Миклух, И. В. Применение ультрафильтрации для нормализации молока и молочных продуктов по белку / И. В. Миклух, Е. В. Беспалова, О. В. Дымар // Техника и технология пищевых производств: VIII Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов: тез. докл.: в 2 ч., г. Могилев, 26–27 апреля 2012 г. / Могилев гос. ун-т продовольствия; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2012 – Ч. 1. – С. 232.
2. Miklukh, I. V. Primeneniye ul'trafil'tratsii dlya normalizatsii moloka i molochnykh produktov po belku [Application of ultrafiltration for normalization of milk and milk products by protein] / I. V. Miklukh, Ye. V. Bespalova, O. V. Dymar // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv: VIII Mezhdunar. nauch. konf. studentov i aspirantov, Mogilev, 26–27 apr. 2012 g.: tez. dokl.: v 2 ch. / Mogilev gos. un-t prodovol'stviya; redkol.: A. V. Akulich (otv. red.) [i dr.]. – Mogilev, 2012 – CH. 1. – S. 232.
3. Дымар, О. В. Концентрирование белков молока с применением технологии ультрафильтрации / О. В. Дымар, И. В. Миклух, М. В. Зубик, Е. В. Беспалова // Инновационные процессы в АПК: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию образования Аграр. фак. РУДН, г. Москва, 13–15 апреля 2011 г. / Рос. ун-т. дружбы народов. – М., 2011. – С. 105–107.
3. Dymar, O. V. Kontsentrirvaniye belkov moloka s primeneniye tekhnologii ul'trafil'tratsii [Concentration of milk proteins using ultrafiltration technology] / O. V. Dymar, I. V. Miklukh, M. V. Zubik, Ye. V. Bespalova // Innovatsionnyye protsessy v APK: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 50-letiyu obrazovaniya Agrar. fak. RUDN, g. Moskva, 13–15 aprelya 2011 g. / Ros. un-t. druzhby narodov. – M., 2011. – S. 105–107.
4. Батурина, В. В. Современные тенденции на рынке молочных функциональных продуктов / В. В. Батурина, П. О. Большакова // Экон. среда. – 2019. – № 2 (28). – С. 67–70.
4. Baturina, V. V. Sovremennyye tendentsii na rynke molochnykh funktsional'nykh produktov [Current trends in the functional dairy products market] / V. V. Baturina, P. O. Bol'shakova // Ekon. sreda. – 2019. – № 2 (28). – S. 67–70.
5. Пономарев, А. Н. Сывороточные ингредиенты для производства специализированных продуктов питания / А. Н. Пономарев, Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова // Перераб. молока. – 2020. – № 2. – С. 6–7.
5. Ponomarev, A. N. Syvorotochnyye ingredienty dlya proizvodstva spetsializirovannykh produktov pitaniya [Whey ingredients for the production of specialized food products] / A. N. Ponomarev, Ye. I. Mel'nikova, Ye. V. Bogdanova // Pererab. moloka. – 2020. – № 2. – S. 6–7.
6. Whey proteins: from milk to medicine / ed.: H. C. Deeth, N. Bansal. – London: Academic Press, 2019. – 746 p.
7. Панов, Ю. Т. Полиамидные микрофильтрационные мембраны с улучшенными порометрическими и прочностными свойствами / Ю. Т. Панов, А. В. Тарасов, С. А. Лепешин, Е. В. Ермолаева // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12-2. – С. 258–262.
7. Panov, YU. T. Poliamidnyye mikrofil'tratsionnyye membrany s uluchshennymi porometricheskimi i prochnostnymi svoystvami [Polyamide microfiltration membranes with improved porosimetric and strength properties] / YU. T. Panov, A. V. Tarasov, S. A. Lepeshin, Ye. V. Yermolayeva // Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii. – 2015. – № 12-2. – S. 258–262.
8. Plisko, T. V. Modification of Polysulfone Ultrafiltration Membranes via Addition of Anionic Polyelectrolyte Based on Acrylamide and Sodium Acrylate to the Coagulation Bath to Improve Antifouling Performance in Water Treatment / T. V. Plisko, A. V. Bilydukevich [et al.] // Membranes. – 2020. – 10, 264. URL: <https://doi.org/10.3390/membranes10100264>