

Разработка технологии получения безлактозного молока методом диафильтрации

И. М. Донник, С. Г. Майзель, Н. В. Бурачевский✉

Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉E-mail: nikolaburachevsky@mail.ru

Аннотация. Цель. Исследование направлено на решение задачи, связанной с разработкой технологии получения экологически чистого продукта животного происхождения – безлактозного молока. Это позволит решить проблему потребления молока и молочных продуктов людьми, не переносящими молочный сахар по физиологическим причинам. Анализируя на основании литературного обзора современное состояние вопроса производства безлактозного молока, можно сделать вывод, что существующие технологии имеют определенные недостатки, обусловленные изменением состава исходного продукта или существенной сложностью технологической цепочки. Предлагаемая разработка основана на методе диафильтрации молока, состоящем из нескольких повторяющихся циклов. Цикл заключается в разделении молока процессом ультрафильтрации на пермеат (водный раствор лактозы) и концентрат (белки, жир, остатки лактозы). Затем в концентрат добавляется чистая вода в объеме, равном объему отведенного пермеата. Для научно обоснованного подхода к разработке предлагаемой технологии необходимо провести исследование ультрафильтрационного разделения молока, получить оптимальные режимные параметры процесса, определить изменение проницаемости и селективности мембран от концентрации лактозы, рассмотреть возможность получения безлактозного молока с разной м. д. ж., определить количество циклов мембранного процесса диафильтрации. **Методы исследований.** Исследование процесса ультрафильтрационного разделения молока проводилось в лабораторных условиях на мембранной установке с использованием органических и неорганических мембран. В экспериментах определялись основные характеристики ультрафильтрационных мембран – проницаемость и селективность при изменяющихся параметрах (диапазон параметров: $P = 0,15 \dots 0,5$ МПа, $t = 35 \dots 65$ °С). **Результаты.** На основе полученных экспериментальных данных путем их обработки и оптимизации параметров были получены оптимальные режимы процесса разделения молока ультрафильтрацией. Определены следующие параметры: скорость продукта в надмембранном пространстве, рабочее давление процесса разделения, его температура. Отобраны предпочтительные ультрафильтрационные мембраны для системы «мембрана – молоко». **Научная новизна.** Для разработки технологии получения безлактозного молока впервые проведен ряд исследований и экспериментов, таких как изменение проницаемости и селективности мембран от концентрации лактозы, получение безлактозного молока с разной м. д. ж., определено количество циклов мембранного процесса диафильтрации.

Ключевые слова: лактоза, безлактозное молоко, ультрафильтрация, диафильтрация, органические мембраны, неорганические мембраны, селективность, проницаемость

Для цитирования: Донник И. М., Майзель С. Г., Бурачевский Н. В. Разработка технологии получения безлактозного молока методом диафильтрации // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 06. С. 766–778. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-766-778>.

Дата поступления статьи: 09.02.2024, **дата рецензирования:** 14.05.2024, **дата принятия:** 23.05.2024.

Development of technology for the production of lactose-free milk by diafiltration

I. M. Donnik, S. G. Mayzel, N. V. Burachevskiy✉

Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: nikolaburachevsky@mail.ru

Abstract. The purpose. The research is aimed at solving the problem related to the development of technology for producing an environmentally friendly product of animal origin – lactose-free milk. This will solve the problem of consumption of milk and dairy products by people who do not tolerate milk sugar for physiological reasons. Analyzing, on the basis of a literary review, the current state of the issue of lactose-free milk production, it can be concluded that existing technologies have certain disadvantages due to changes in the composition of the initial product, or the significant complexity of the technological chain. The proposed development is based on a method of milk diafiltration consisting of several repetitive cycles. The cycle consists in the separation of milk by the ultrafiltration process into permeate (aqueous lactose solution) and concentrate (proteins, fat, lactose residues). Then pure water is added to the concentrate in a volume equal to the volume of the discharged permeate. For a scientifically based approach to the development of the proposed technology, it is necessary to conduct a study of ultrafiltration separation of milk, obtain optimal operating parameters of the process, determine the change in permeability and selectivity of membranes from lactose concentration, consider the possibility of obtaining lactose-free milk with different mass fraction of fat, determine the number of cycles of the membrane diafiltration process. **Research methods.** The study of the process of ultrafiltration separation of milk was carried out in laboratory conditions on a membrane installation using organic and inorganic membranes. The experiments determined the main characteristics of ultrafiltration membranes – permeability and selectivity, with varying parameters (parameter range: $P = 0.15 \dots 0.5$ MPa, $t = 35 \dots 65$ °C). **Results.** Based on the experimental data obtained, by processing them and optimizing the parameters, optimal modes of the milk separation process by ultrafiltration were obtained. The following parameters are defined: the velocity of the product in the supramembrane space, the operating pressure of the separation process, its temperature. The preferred ultrafiltration membranes for the membrane-milk system have been selected. **Scientific novelty.** To develop a technology for producing lactose-free milk, for the first time a number of studies and experiments were carried out, such as changing the permeability and selectivity of membranes from the concentration of lactose, obtaining lactose-free milk with mass fraction of fat the number of cycles of the membrane diafiltration process was determined.

Keywords: lactose, lactose-free milk, ultrafiltration, diafiltration, organic membranes, inorganic membranes, selectivity, permeability

For citation: Donnik I. M., Mayzel S. G., Burachevskiy N. V. Development of technology for the production of lactose-free milk by diafiltration. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (06): 766–778. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-766-778>. (In Russ.)

Date of paper submission: 09.02.2024, **date of review:** 14.05.2024, **date of acceptance:** 23.05.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Известно, что молоко и молочные продукты играют большую роль в полноценном питании человека. Достаточно большое количество людей имеют непереносимость к молочному сахару – лактозе – и, соответственно, не могут употреблять молоко и продукты, содержащие молоко. Неспособность употреблять молочные продукты может негативно сказаться на здоровье человека, ведь по количеству содержащихся в молоке полезных для организма веществ аналогов оно не имеет. В молоке содержится около сотни различных компонентов: более 20 видов аминокислот, 25 жирных кислот, 30 минеральных солей и 20 видов различных витаминов [1].

Основные компоненты молока – молочный жир, белки и лактоза. В зависимости от различных факторов (условия содержания, рацион и т. д.) количество молочного жира в цельном молоке может составлять от 2,9 до 4,2 % (масс.), количество белков – от 2,85 до 4,55 % (масс.), количество лактозы – от 3,8 до 5,4 % (масс.). Как видно из состава основных компонентов молока, лактоза имеет достаточно весомую долю, приводящую к появлению специфической сладости продукта. Полезность лактозы несомненна, но она не может конкурировать по ценности с аминокислотами (среди которых есть и незаменимые) и минеральными солями, содержащимися в коровьем молоке. Для полноценного пи-

тания человек должен получать с пищей полезные компоненты молока, такие как молочные белки, содержащие целый спектр аминокислот [1; 6].

Так как некоторые группы населения страдают непереносимостью лактозы, это приводит к невозможности употребления молока и, соответственно, к обеднению рациона питания ценными компонентами. Медицина объясняет непереносимость лактозы тем, что у данной группы населения в организме недостаточно фермента, который расщепляет лактозу на две составляющие – глюкозу и галактозу. Фермент этот – лактаза, к сожалению, вырабатывается не у всех людей. Во всем мире известна данная проблема, в некоторых странах практически все население неспособно употреблять молоко в качестве продукта (страны Южной Америки и Африки). В России примерно 20 % взрослого населения не переносят лактозу [2–4]. Это очень большая группа, поэтому проблема обеспечения людей полноценными молочными продуктами является очень значимой.

Решением обозначенной выше проблемы может стать разработка технологии получения безлактозного молока. Безлактозным считается молоко, у которого содержание лактозы менее 0,01 % (масс.) [7]. Как снизить содержание лактозы в молоке? Анализ этого вопроса показывает, что в мире применяют для этих целей три технологии [2; 7; 8; 12]. Первая заключается в сквашивании молока (метод подобен технологии производства кисломолочных продуктов), при этом конечный продукт отличается от молока. Вторая технология основана на гидролизе лактозы в молоке с помощью ферментов, при этом существенно повышается сладость конечного продукта. К тому же редко удается снизить концентрацию лактозы ниже 1 % (масс.) (это так называемое низколактозное молоко). Третий, наиболее совершенный метод, разработан компанией Valio (Финляндия). Он состоит из комбинации баромембранного разделения молока и расщепления лактозы в молоке с помощью ферментов [7].

Рынок безлактозной молочной продукции в России сократился в 2014 году, после ввода продовольственного эмбарго, под которое попали многие

виды сельскохозяйственной продукции [15; 17–20]. До эмбарго главным поставщиком безлактозной продукции была финская компания Valio. Что же касается собственного производства, то на сегодняшний день рынок безлактозного молока в России крайне мал и составляет не более 0,1 % от общего объема реализуемого молока. И хотя запрет подтолкнул некоторые компании на развитие собственного производства, до полного импортозамещения еще далеко, и на сегодняшний день безлактозные продукты занимают менее 1 % от всего молочного рынка страны. В основном в России производится низколактозное молоко, которое получается за счет расщепления лактозы ферментами [7].

Целью настоящей работы явилось исследование процесса ультрафильтрации, являющегося основным в технологии получения безлактозного молока.

С целью научно обоснованного подхода к разработке предлагаемой технологии необходимо провести исследование процесса ультрафильтрационного разделения молока при различных изменяющихся параметрах. Это позволит определить необходимые режимы осуществления процессов получения безлактозного молока. Для этого в данной работе поставлены следующие задачи:

- разработать оптимальные режимы осуществления процесса ультрафильтрации;
- исследовать изменение проницаемости и селективности мембран от концентрации лактозы;
- рассмотреть возможность получения безлактозного молока с разной м. д. ж.;
- определить количество циклов мембранного процесса диализации.

Методология и методы исследования (Methods)

Для проведения экспериментов в качестве объекта исследований было принято молоко по ГОСТ Р 53503-2009 «Молоко обезжиренное – сырье» (таблица 1). Для осуществления каждой серии экспериментов отбиралась партия молока в объеме 10 литров. В экспериментах изменялись следующие параметры процесса ультрафильтрации: скорость течения молока в надмембранном пространстве в диапазоне от 0,5 до 4,0 м/с; рабочее давление в диапазоне 0,15–0,5 МПа; температура в диапазоне $t = 35...65$ °С.

Таблица 1
Физико-химические характеристики обезжиренного молока (средние значения)

Параметры	Молоко
Белок общий, % (масс.)	3,15 ± 0,04*
Лактоза, % (масс.)	4,55 ± 0,02*
Жир, % (масс.)	0,15 ± 0,02
Минеральные вещества, % (масс.)	0,85 ± 0,05
Сухие вещества, % (масс.)	8,70 ± 0,03
Кислотность, °Т	17,95 ± 0,15

Примечание. $P < 0,05$.

Table 1
Physico-chemical parameters of skimmed milk (average values)

Parameters	Milk
Total protein, % (wt.)	3.15 ± 0.04*
Lactose, % (wt.)	4.55 ± 0.02*
Fat, % (wt.)	0.15 ± 0.02
Mineral substances, % (wt.)	0.85 ± 0.05
Dry matter, % (wt.)	8.70 ± 0.03
Acidity, °T	17.95 ± 0.15

Note. $P < 0.05$.

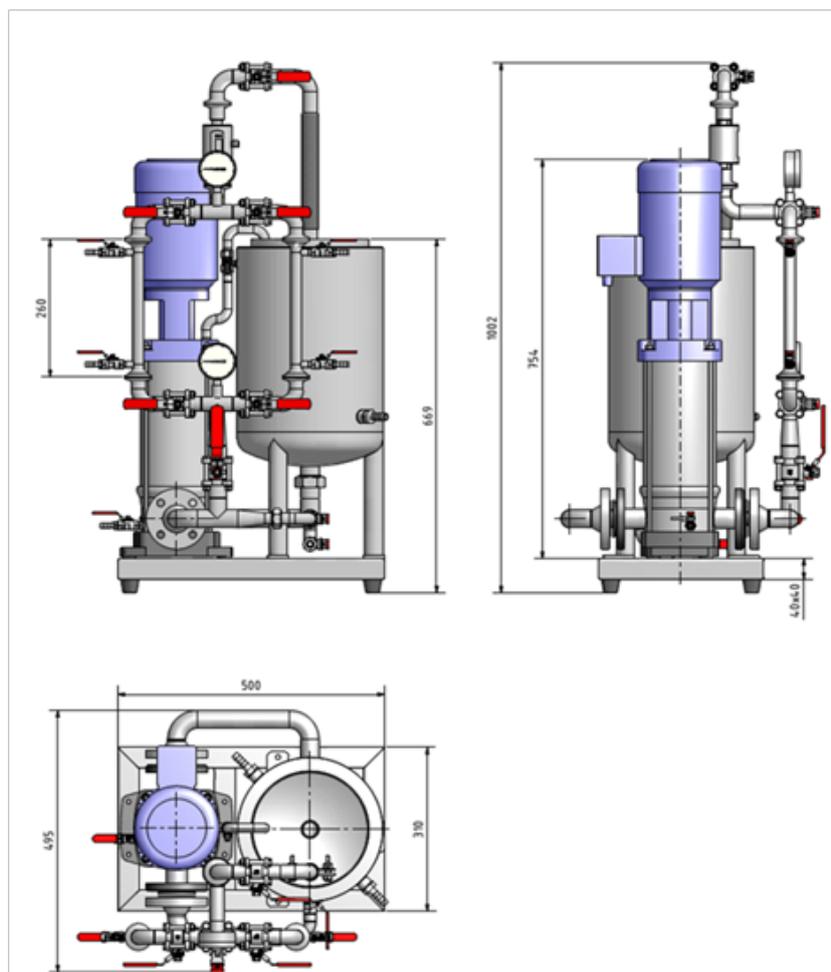


Рис. 1. Схема лабораторной установки
Fig. 1. The scheme of the laboratory installation

Исследования осуществлялись в соответствии со следующими нормативными документами: ГОСТ 26809.1-2014 «Межгосударственный стандарт. Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу»; ГОСТ Р 54668-2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения массовой доли влаги и сухого вещества»; ГОСТ 25179-90 «Молоко. Методы определения белка»; ГОСТ 5867-90 «Молоко и молочные продукты. Методы определения жира»; ГОСТ Р 51259-99 «Молоко и молочные продукты. Метод определения лактозы и галактозы»; ГОСТ 3624-92 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности».

Исследование процесса ультрафильтрации проводилось на лабораторной установке (рис. 1). Применяемые в установке мембранные элементы с площадью селективного слоя $0,0055 \text{ м}^2$ (55 см^2) по своим функциональным свойствам полностью аналогичны промышленным мембранным элементам с площадью селективного слоя около $0,5 \text{ м}^2$, таким образом, являются показательными с точки зрения как качества разделения, так и производительности мембраны.

В установке возможно проводить исследование с двумя различными мембранными элементами. В циркуляционный контур установки входит бак-накопитель объемом 15 л. Используемая сталь трубопроводов, насосов, запорной арматуры – 316L(S). Применяемые мембранные элементы – химически стойкие во всем диапазоне pH (от 0 до 14), что позволяет осуществлять быструю мойку химическими реагентами без опасения нарушения селективного слоя мембраны. Селективный слой мембранных элементов получен технологиями, обеспечивающими малый разброс размеров пор (не более $\pm 10 \%$), что гарантирует качество разделения. Система уплотнений мембранных элементов обеспечивает герметизацию не торца мембраны, а края боковой наружной поверхности, что гарантирует разделение исходного продукта, концентрата и пермеата. Применяемый в установке циркуляционный насос, предназначен для перекачивания сред с различной вязкостью. Максимальное трансмембранное давление в установке – до 0,8 МПа. Температура исследуемого процесса – до $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

В экспериментах определялись две основные характеристики ультрафильтрационных мембран:

проницаемость G и селективность ϕ в процессе разделения молока при различных режимных параметрах. Проницаемость мембран G ($\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) рассчитывалась по уравнению:

$$G = Q_n / (S\tau),$$

где Q_n – объем пермеата, собранный за 1 час, дм^3 ;

S – площадь поверхности мембраны, м^2 ;

τ – время процесса разделения, ч.

Селективность мембран ϕ (%) по белкам рассчитывалась по уравнению:

$$\phi = 1 - x_n / x_o,$$

где x_n – концентрация пермеата;

x_o – концентрация молока над мембраной.

Результаты (Results)

Нами установлено, что эксперименты с ультрафильтрационными мембранами следует осуществлять, учитывая гидродинамические условия, т. к. процесс разделения сопряжен с заметным влиянием концентрационной поляризации. Это объясняется малой скоростью диффузии белковой составляющей молока и довольно большими значениями проницаемости мембран. Проведенные нами эксперименты показали, что при малых значениях u ($\leq 0,25$ м/с) проницаемость всех типов исследуемых мембран очень низкая ($G \leq 0,5 \dots 5$ $\text{дм}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$). По-видимому, это можно объяснить тем, что высокая концентрация белков у поверхности мембраны приводит к образованию труднопроницаемого слоя. Этот эффект наиболее ярко проявляется у неорга-

нических мембран, т. к. они имеют большую производительность по сравнению с органическими. Чтобы преодолеть сопротивление труднопроницаемого слоя, необходимо увеличивать u . Проницаемость выходит на «рабочий» уровень при достижении следующих значений: $u \geq 0,5$ м/с для мембран серии УПМ и ТАМІ 15кD; $u \geq 1,0$ м/с для мембран серии КУФЭ и ТАМІ 50кD. Стабилизация проницаемости, как видно из графика зависимости $G(u)$, достигается при $u \geq 2,0 \dots 3,0$ м/с. Чтобы избежать влияния концентрационной поляризации при проведении исследований, значение u поддерживалось в пределах 3,0–3,5 м/с.

Осуществление экспериментов, направленных на исследование влияния внешних факторов, таких как давление, температура и концентрация, на основные характеристики мембран, проводились с целью научного подхода к определению оптимальных условий процесса ультрафильтрационного разделения молока.

Влияние рабочего давления на селективность и проницаемость мембран приведено на рис. 3 и 4. Как видно из графика (рис. 3), проницаемость имеет более высокие значения у керамических мембран. К тому же характер зависимости $G(P)$ для этих мембран имеет тенденцию к росту во всем диапазоне давления, чего нельзя сказать о полимерных мембранах, у которых проницаемость даже падает при значениях давления больше 0,40–0,45 МПа.

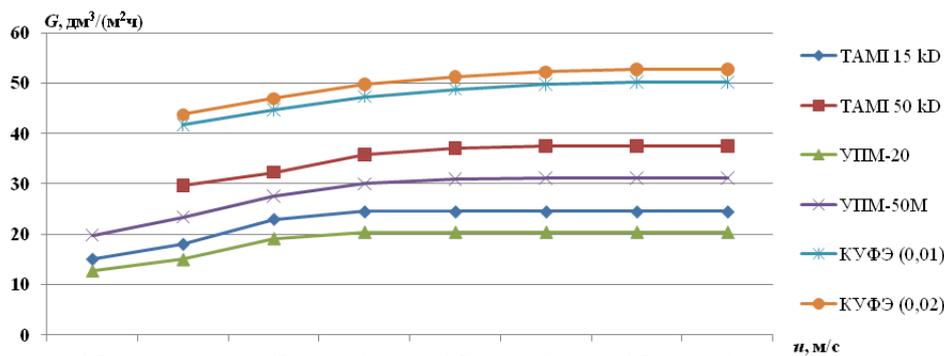


Рис. 2. Зависимость проницаемости мембран от скорости течения молока над мембраной

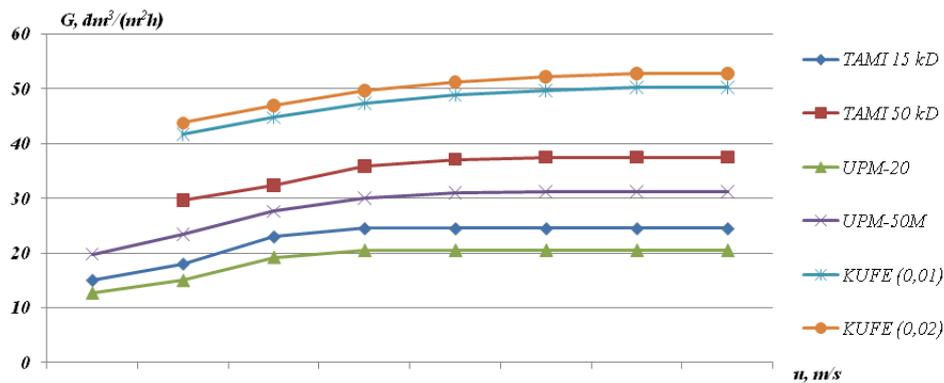


Fig. 2. Dependence of membrane permeability on the flow rate of milk over the membrane

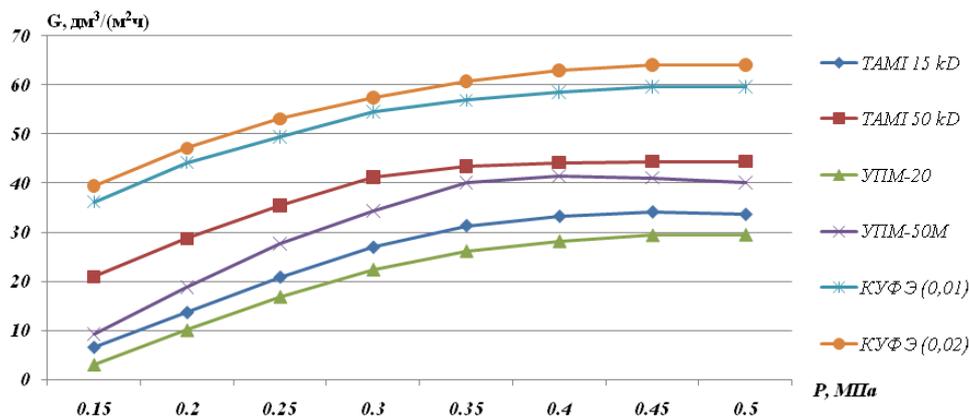


Рис. 3. Зависимость проницаемости мембран от давления

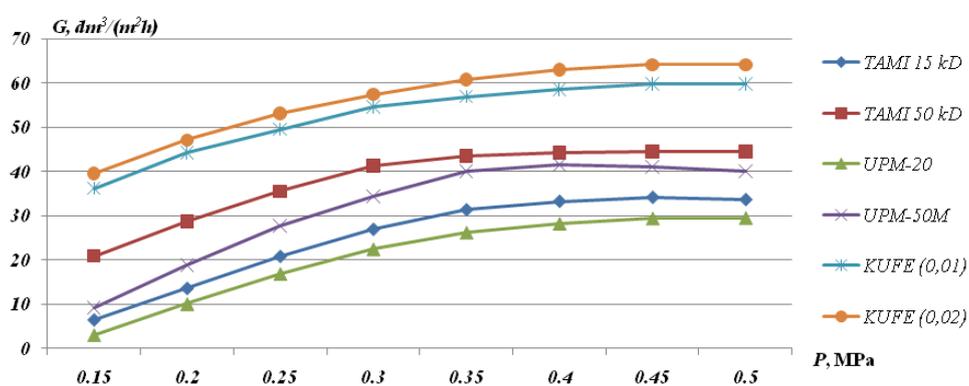


Fig. 3. Dependence of membrane permeability on pressure

Зависимость $\varphi(P)$ (рис. 4) показала, что селективность ультрафильтрационных мембран изменяется при разных значениях рабочего давления. Наиболее ярко эти изменения проявляются в области давления от 0,10 до 0,25 МПа. У органических мембран максимальную селективность имеет мембрана УПМ-50М ($\varphi = 0,964$), у мембраны УПМ-20 $\varphi = 0,957$. У неорганических мембран максимальную селективность имеет мембрана КУФЭ (0,01), $\varphi = 0,987$, у мембраны КУФЭ (0,02) селективность заметно ниже – $\varphi = 0,950$. У мембран ТАМІ 15kD $\varphi = 0,977$, у ТАМІ 50kD $\varphi = 0,970$. Такая зависимость $\varphi(P)$ может быть объяснена диффузией белков через поры мембраны при значениях рабочего давления от 0,10 до 0,25 МПа. При давлении выше 0,25 МПа снижение селективности органических мембран объясняется их менее жесткой структурой.

Анализ зависимостей $G(P)$ и $\varphi(P)$ показал, что для процесса ультрафильтрации и диафильтрации молока рабочее давление необходимо поддерживать в диапазоне 0,3–0,35 МПа.

Эксперименты по влиянию температуры на характеристики мембран (рис. 5, 6) проводилось с двумя типами мембран – КУФЭ (0,01) и ТАМІ 50 kD, которые были отобраны по вышеприведенным результатам. С целью исследования процесса ультрафильтрации в течение производственного цикла в данном исследовании были использованы образцы

молока с разной концентрацией (1 – 8,5 % СВ, 2 – 12 % СВ, 3 – 16,5 % СВ, 4 – 20 % СВ), что соответствует исходной концентрации молока и концентрации молока в процессе диафильтрации. Партии молока разной концентрации получали предварительным разделением исходного молока процессом ультрафильтрации, отводя пермеат до необходимого значения концентрации растворенных веществ.

Исследования показали, что зависимость $G(t)$ имеет нелинейный характер и тенденцию к увеличению проницаемости в определенном интервале температуры. Влияние температуры на селективность мембран показано на рис. 6. В интервале температуры 35–53 °С селективность остается постоянной и имеет высокое значение (0,989–0,985). Дальнейшее повышение температуры сопровождается снижением селективности. Большое влияние на зависимость $\varphi(t)$ оказывает концентрация белковой фазы в молоке. На наш взгляд, этот эффект можно объяснить деформацией молекул с большой массой [16] и их проникновением в поры мембраны.

Исследование процесса ультрафильтрационного разделения молока, проведенное в данной работе, позволило определить оптимальные режимные параметры процесса: скорость потока молока над мембраной $u \geq 3,0$ м/с; рабочее давление $P = 0,35$ МПа; температура процесса $t = 45...55$ °С; предпочтительные мембраны КУФЭ (0,01) и ТАМІ – 50 kD.

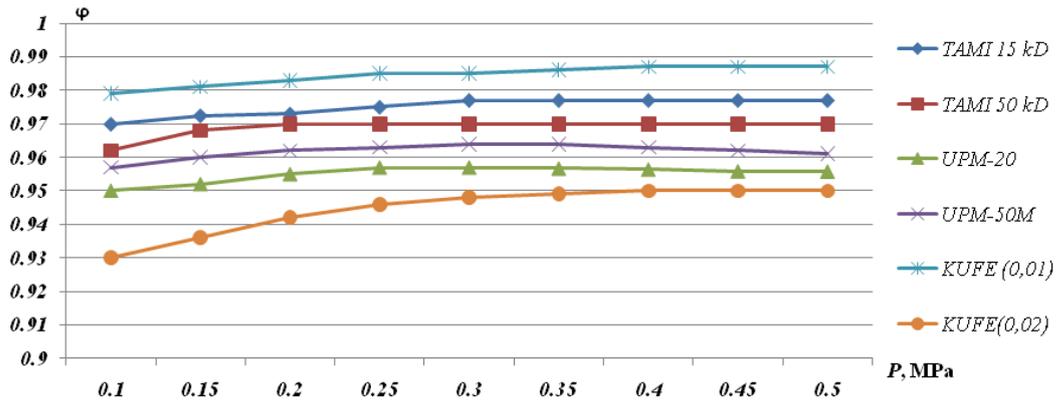


Рис. 4. Зависимость селективности мембран по белкам от давления

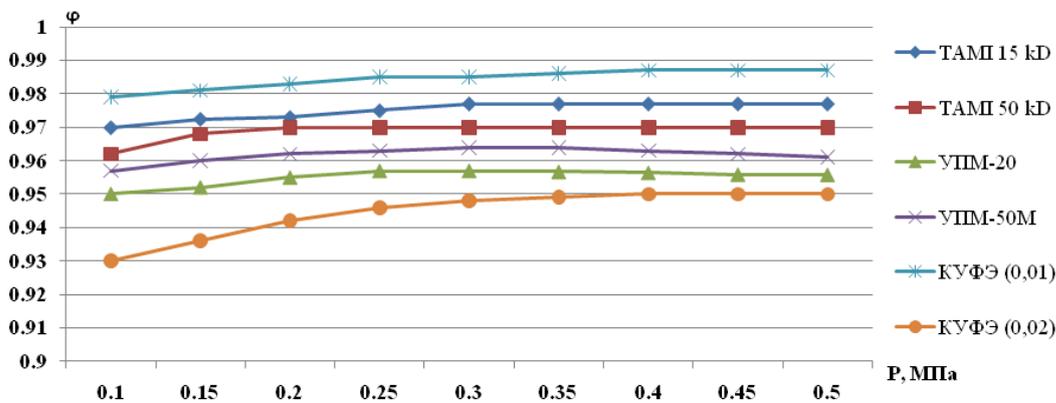


Fig. 4. Dependence of membrane selectivity for proteins on pressure

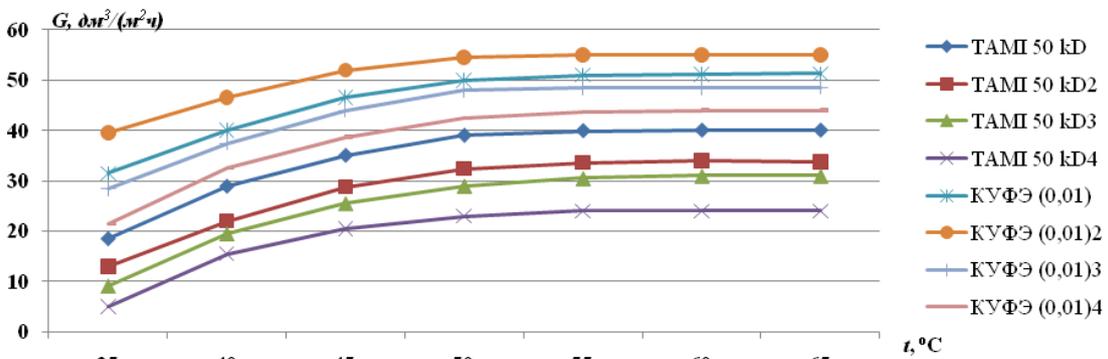


Рис. 5. Зависимость проницаемости мембран от температуры

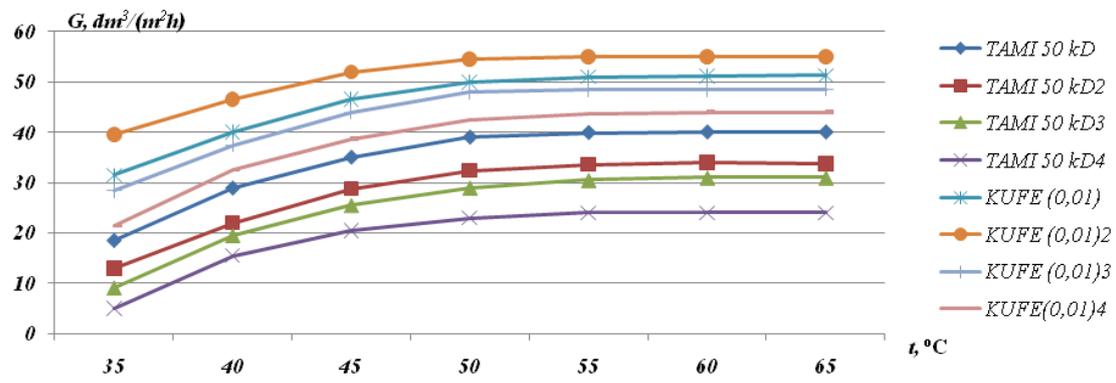


Fig. 5. Dependence of membrane permeability on temperature

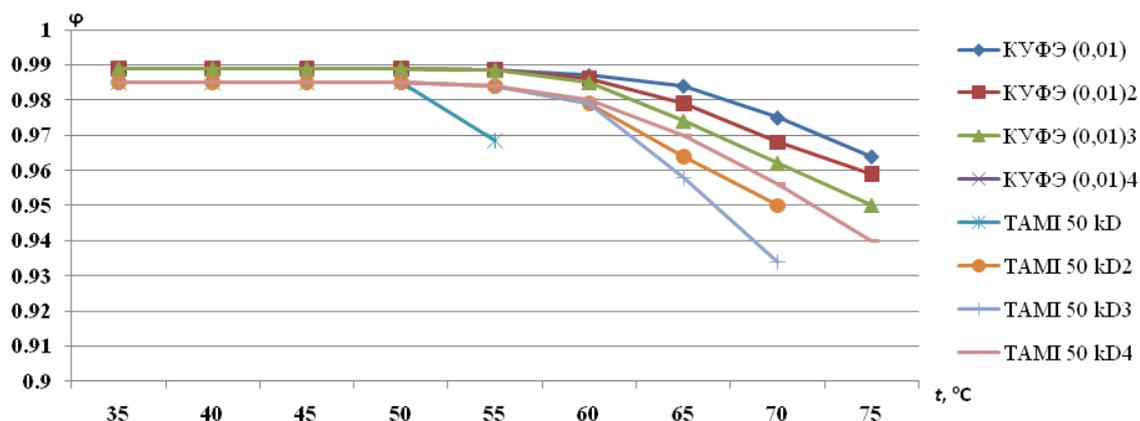


Рис. 6. Зависимость селективности мембран от температуры

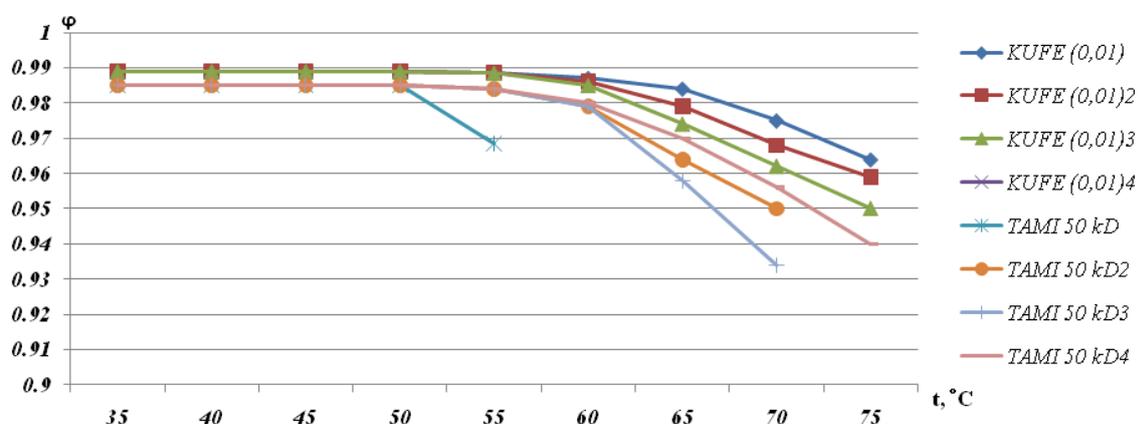


Fig. 6. Temperature dependence of membrane selectivity

Так как концентрация лактозы в молоке в процессе диафильтрации постоянно снижается, представляет интерес исследование изменения проницаемости и селективности мембран от концентрации лактозы. Знание этой закономерности позволит научно обоснованно проектировать промышленные мембранные установки для производства безлактозного молока. Полученная в результате экспериментов зависимость проницаемости от концентрации лактозы в молоке приведена на рис. 7. Как видно из графика, проницаемость мембран существенно зависит от концентрации лактозы в молоке. Так, при концентрации, близкой к нормативу для безлактозного молока ($\leq 0,01$ % масс.), проницаемость достигает значения $45\text{--}55 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, это на $30\text{--}35\%$ больше, чем проницаемость при исходном содержании лактозы в молоке ($4,65$ % масс.).

Зависимость селективности от концентрации лактозы в молоке приведена на рис. 8. Селективность мембран от концентрации лактозы в молоке изменяется незначительно. Наблюдается небольшое снижение селективности при увеличении концентрации лактозы, но этот фактор может не учитываться, так как имеет ничтожно малое значение.

Безлактозное молоко, потребляемое человеком, может иметь разное содержание жира (м. д. ж.). Исследование, направленное на то, чтобы определить рациональный подход к методу производства безлактозного молока с разной м. д. ж., также имеет определенный интерес. Поскольку мембраны полностью задерживают молочный жир, можно предположить, что получить безлактозное молоко можно не только из обезжиренного молока, а также из молока с м. д. ж. $> 0,1$ % масс. Результаты исследования приведены на рис. 9. При м. д. ж. $3,5\text{--}4,5$ % (цельное молоко) проницаемость мембран имеет значения примерно на 50 % меньше, чем для обезжиренного молока. Это можно объяснить образованием слоя жира на поверхности мембраны, что существенно снижает ее проницаемость. Отсюда можно сделать вывод, что рационально получать безлактозное молоко из обезжиренного молока. Безлактозное молоко с разной м. д. ж. целесообразно получать нормализацией обезжиренного безлактозного молока высокожирными сливками.

Лабораторные исследования с обезжиренным молоком показали, что снизить содержание лактозы в молоке до значений, соответствующих регламенту, возможно при шестикратном проведении процесса диафильтрации (таблица 2).

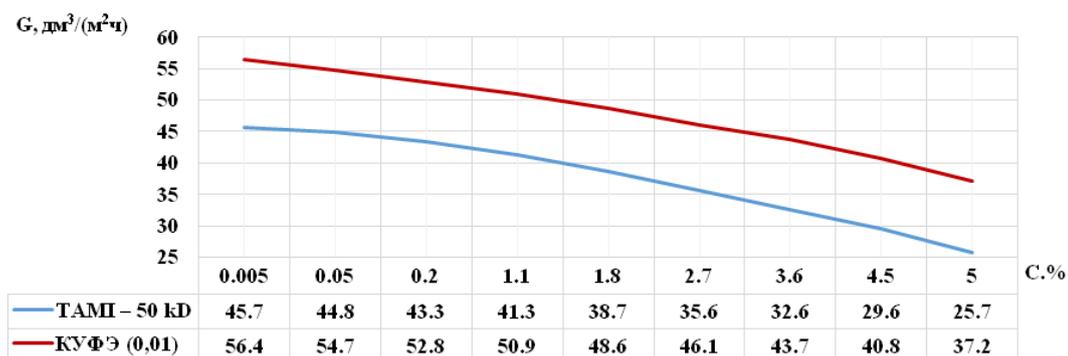


Рис. 7. Зависимость проницаемости мембран от концентрации лактозы в молоке

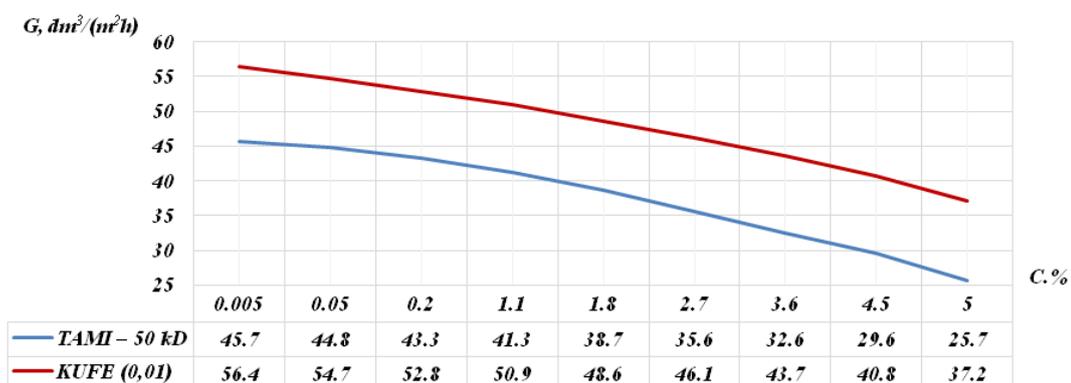


Fig. 7. Dependence of membrane permeability on lactose concentration in milk

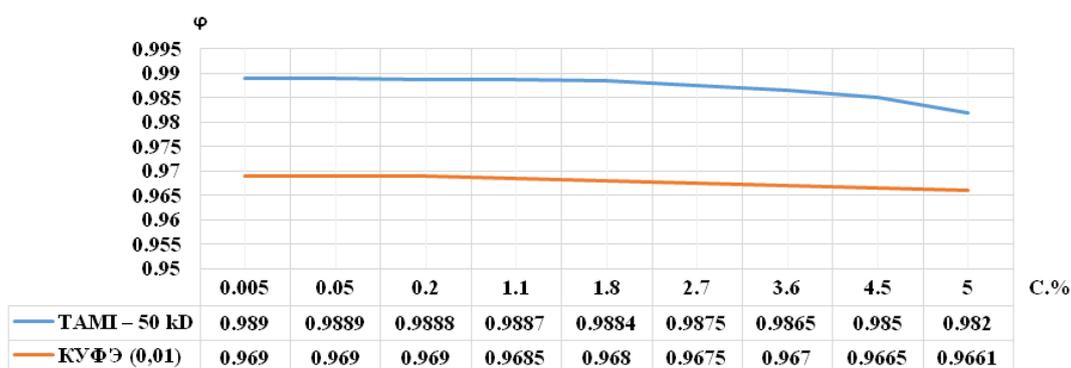


Рис. 8. Зависимость селективности мембран от концентрации лактозы в молоке

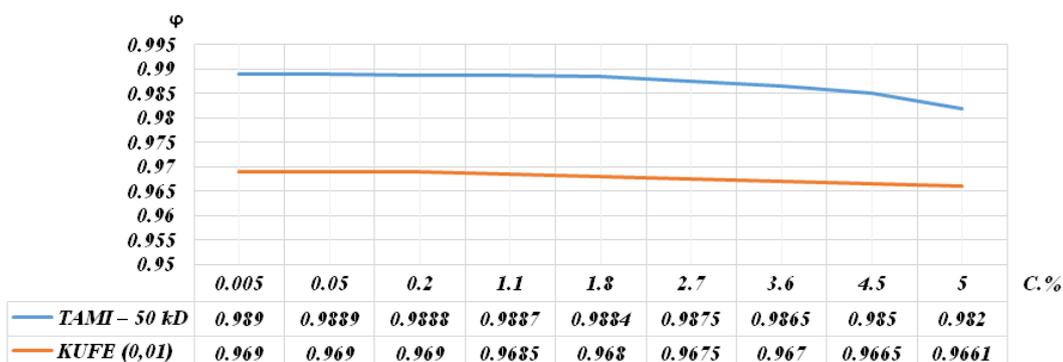


Fig. 8. Dependence of membrane selectivity on lactose concentration in milk

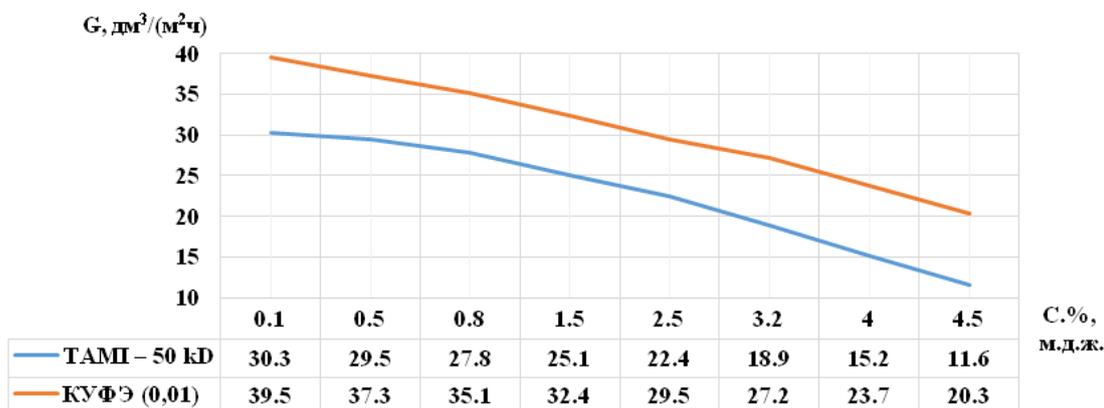


Рис. 9. Зависимость проницаемости мембран от м. д. ж. в молоке

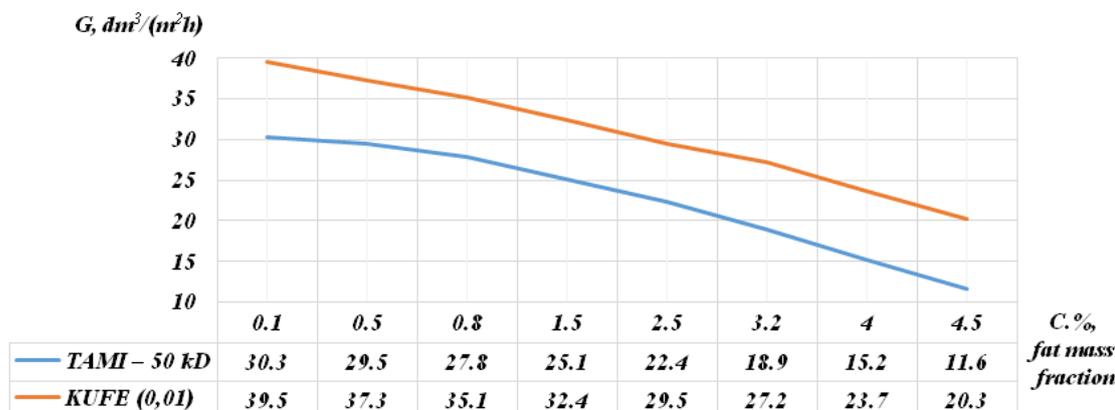


Fig. 9. The dependence of membrane permeability on mass fraction of fat in milk

Таблица 2

Физико-химические показатели молока (средние значения)

Параметры	Исходное молоко	Молоко после диафильтрации
Белок общий, % (масс.)	3,05 ± 0,04*	3,05 ± 0,04*
Лактоза, % (масс.)	4,65 ± 0,02*	≤ 0,008 ± 0,002*
Жир, % (масс.)	0,1 ± 0,02	0,1 ± 0,02
Минеральные вещества, % (масс.)	0,82 ± 0,05	0,82 ± 0,05
Сухие вещества, % (масс.)	8,57 ± 0,03	3,93 ± 0,03
Кислотность, °Т	17,5 ± 0,15	18,0 ± 0,15

Примечание. $P < 0,05$.

Table 2

Physico-chemical parameters of milk (average values)

Parameters	The original milk	Milk after diafiltration
Total protein, % (wt.)	3.05 ± 0.04*	3.05 ± 0.04*
Lactose, % (wt.)	4.65 ± 0.02*	≤ 0.008 ± 0.002*
Fat, % (wt.)	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02
Mineral substances, % (wt.)	0.82 ± 0.05	0.82 ± 0.05
Dry matter, % (wt.)	8.57 ± 0.03	3.93 ± 0.03
Acidity, °T	17.5 ± 0.15	18.0 ± 0.15

Note. $P < 0.05$.

Исследование процесса разделения молока, проведенное в данной работе, позволило определить рациональные режимные параметры процесса диафильтрации молока:

1. Скорость потока молока над мембраной $u \geq 3,0$ м/с.
2. Рабочее давление $P = 0,35$ Мпа.
3. Температура процесса $t = 45 - 55$ °С.

4. Мембраны КУФЭ (0,01) и TAMИ – 50 kD.
5. Степень концентрирования молока на каждой стадии диафильтрации – 3.
6. Количество стадий диафильтрации – 6.
7. Коэффициент площади мембранной поверхности на каждой стадии диафильтрации (начиная с первой): 1,0; 0,94; 0,86; 0,79; 0,72; 0,65.
8. Исходный продукт – обезжиренное молоко.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Для разработки технологии получения безлактозного молока проведен ряд исследований и экспериментов. Предлагаемая разработка основана на методе диафильтрации молока, состоящем из нескольких повторяющихся циклов. Цикл заключается в разделении молока процессом ультрафильтрации на пермеат (водный раствор лактозы) и концентрат (белки, жир, остатки лактозы). Затем в концентрат добавляется чистая вода в объеме, равном объему отведенного пермеата.

Для научно обоснованного подхода к разработке предлагаемой технологии проведено исследование ультрафильтрационного разделения молока, получены рациональные режимные параметры процесса: скорость потока молока над мембраной $u \geq 3,0$ м/с; рабочее давление $P = 0,35$ МПа; температура процесса $t = 45...55$ °С; предпочтительные мембраны КУФЭ (0,01) и ТАМІ – 50 kD.

Исследовано изменение проницаемости и селективности мембран от концентрации лактозы, так как концентрация ее в молоке в процессе диафильтрации постоянно снижается. Получено, что степень концентрирования молока на каждой ста-

дии диафильтрации равна 3, количество стадий диафильтрации – 6, коэффициент площади мембранной поверхности на каждой стадии диафильтрации (начиная с первой): 1,0; 0,94; 0,86; 0,79; 0,72; 0,65. Знание этой закономерности позволит научно обоснованно проектировать промышленные мембранные установки для производства безлактозного молока.

Результаты исследования, направленные на то, чтобы определить рациональный подход к методу производства безлактозного молока с разной м. д. ж., показали, что проницаемость мембран от м. д. ж. в молоке зависит очень сильно. При м. д. ж. 3,5–4,5 % (цельное молоко) проницаемость мембран имеет значения примерно на 50 % меньше, чем для обезжиренного молока. Это можно объяснить образованием слоя жира на поверхности мембраны, что существенно снижает ее проницаемость. Нами сделан вывод, что рационально получать безлактозное молоко из обезжиренного молока.

Полученные в данной работе результаты, на наш взгляд, вносят определенный вклад в развитие мембранных процессов и явятся основой разработки технологии получения безлактозного молока.

Библиографический список

1. Евдокимов И. А., Володин Д. Н., Гридин А. С., Куликова И. К., Анисимов Г. С. Современные подходы к классификации лактозосодержащего сырья // Сыроделие и маслоделие. 2022. № 4. С. 34–37. DOI: 10.31515/2073-4018-2022-4-34-37.
2. Мельникова Е. И., Рудниченко Е. С., Кузнецова С. А. Молочные ингредиенты – будущее молочной индустрии // Молочная промышленность. 2023. № 5. С. 13–15. DOI: 10.21603/1019-8946-2023-5-21.
3. Евдокимов И. А. Роль научных исследований в создании высокотехнологичных производств в молочной отрасли // Переработка молока. 2022. № 2 (268). С. 6–11. DOI: 10.33465/2222-5455-2022-2-6-11.
4. Алибеков Р. С., Овчинникова О. Ю. Лактозная непереносимость и безлактозное молоко // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2019. № 1. С. 37–43.
5. Пономарев А. Н., Мельникова Е. И., Станиславская Е. Б., Самойлова В. Н. Молоко как сырье для производства пищевых ингредиентов. Часть 1. Фракционирование обезжиренного молока с целью получения ингредиентов // Молочная промышленность. 2021. № 4. С. 34–36. DOI: 10.31515/1019-8946-2021-04-34-36.
6. Potoroko I. Yu., Kadi A. M. Y., Wang M., He M., Zhang Y., Chen X., Chnao T. Development of yogurt based on lactose-free milk with a functional bioactive compound // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2023. Vol. 1, No. 2. Pp. 57–64.
7. Тимкин В. А., Новопашин Л. А., Минин П. С. Некоторые аспекты разработки технологии безлактозного молока с применением баромембранных процессов // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2020. № 3 (8). С. 53–62.
8. Замбрини А. В., Донати Э., Руссо К., Пиццикини Д. Способ производства безлактозного молока. Патент на изобретение RU 2766351 C2, 15.03.2022. Заявл. 2019118566, бюл. № 8. 25 с.
9. Горина Т. А. Нормативно-техническая документация «Молоко питьевое низколактозное и безлактозное» // Переработка молока. 2022. № 4 (270). С. 30–32.
10. Храмцов А. Г., Анисимов С. В., Давыдянец Л. Е., Скороходова М. В., Ромахова В. Ю., Жилина М. А. Исследование изомеризации лактозы в процессе производства молочных продуктов // Молочная промышленность. 2023. № 4. С. 67–70. DOI: 10.31515/1019-8946-2023-04-67-70.
11. Лоза Н. В., Кутенко Н. А., Бровкина М. А., Самков А. А., Круглова М. Н. Влияние лактозы на транспортные свойства ионообменных мембран // Мембраны и мембранные технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 301–311. DOI: 10.31857/S2218117223040041.
12. Диханбаева Ф. Т., Тастурганова Э. Ч. Разработка технологии бионапитков на основе верблюжьего молока с использованием дрожжей, сбразивающих лактозу // Global Science and Innovations. Proceedings. 2020. С. 284–286.

13. Горлова А. И., Ильина А. М. Физиологическая роль лактозы нативного и гидролизованного молока: обзор // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2 (92). С. 57–61.
14. Топникова Е. В., Иванова Н. В., Мордвинова В. А. Направления рационального использования пахты при производстве молочной продукции // Сыроделие и маслоделие. 2022. № 6. С. 42–45. DOI: 10.31515/2073-4018-2022-6-42-45.
15. Лозовская Д. С., Дымар О. В. Технологические свойства молозива // Молочная промышленность. 2022. № 1. С. 55–57. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-01-55-57.
16. Славоросова Е. В., Шевчук В. Б., Фиалкова Е. А., Голденшлях О. Н., Нечаев К. А. Перспективный способ переработки молочной сыворотки // Молочная промышленность. 2022. № 12. С. 14–16. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-12-14-16.
17. Ivory R., Mangan D., McCleary B. V. Lactose concentration in low-lactose and lactose-free milk, milk products, and products containing dairy ingredients by high sensitivity enzymatic method (K-lolac), collaborative study: final action 2020.08 // Journal of AOAC International. 2022. Vol. 105, No. 6. Pp. 1617–1624. DOI: 10.1093/jaoacint/qsac070.
18. Gilabert-Oriol G. Ultrafiltration membrane cleaning processes: optimization in seawater desalination plants. De Gruyter, 2021. 104 p. DOI: 10.1515/9783110715149.
19. Kashaninejad M., Razavi S. M. A. The effect of pH and NaCl on the diafiltration performance of camel milk // International Journal of Dairy Technology. 2021. No. 74 (3). Pp. 2431–2438. DOI: 10.1111/1471-0307.12774.
20. Shinde G. P., Kumar R., Reddy K. R., Nadanasabhpathi S., Dutt Semwal A. Effect of pulsed electric field processing on reduction of sulfamethazine residue content in milk // Journal of Food Science and Technology. 2022. Vol. 59, No. 5. Pp. 1931–1938. DOI: 10.1007/s13197-021-05207-0.

Об авторах:

Ирина Михайловна Донник, академик Российской академии наук, почетный работник высшего образования Российской Федерации, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой инфекционной и незаразной патологии, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-8593-7470, AuthorID 313786. *E-mail: imdonnik@presidium.ras.ru*

Сергей Гершевич Майзель, доктор технических наук, профессор, директор НИИ агроэкономического развития, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0009-0000-3838-9961, AuthorID 768905. *E-mail: maizel_sg@urgau.ru*

Николай Викторович Бурачевский, аспирант кафедры инфекционной и незаразной патологии, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0009-0003-1388-3818, AuthorID 1130827. *E-mail: nikolaburachevsky@mail.ru*

References

1. Evdokimov I. A., Volodin D. N., Gridin A. S., Kulikova I. K., Anisimov G. S. Modern approaches to the lactose-containing raw material classification. *Cheesemaking and Buttermaking*. 2022; 4: 34–37. DOI: 10.31515/2073-4018-2022-4-34-37. (In Russ.)
2. Melnikova E. I., Rudnichenko E. S., Kuznetsova S. A. Milk ingredients are the future of dairy production. *Dairy Industry*. 2023; 5: 13–15. DOI: 10.21603/1019-8946-2023-5-21. (In Russ.)
3. Evdokimov I. A. The role of scientific research in the creation of high-tech industries in the dairy industry. *Milk Processing*. 2022; 2 (268): 6–11. DOI: 10.33465/2222-5455-2022-2-6-11. (In Russ.)
4. Alibekov R. S., Ovchinnikova O. Yu. Lactose intolerance and lactose-free milk. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2019; 1: 37–43. (In Russ.)
5. Ponomarev A. N., Melnikova E. I., Stanislavskaya E. B., Samoylova V. N. Milk as a raw material for the production of food ingredients. Part 1. Fractionation of skimmed milk to obtain ingredients. *Dairy Industry*. 2021; 4: 34–36. DOI: 10.31515/1019-8946-2021-04-34-36. (In Russ.)
6. Potoroko I. Yu., Kadi A. M. Y., Wang M., He M., Zhang Y., Chen X., Chnao T. Development of yogurt based on lactose-free milk with a functional bioactive compound. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2023; 1 (2): 57–64.
7. Timkin V. A., Novopashin L. A., Minin P. S. Some aspects of the development of lactose-free milk technology using baromembrane processes. *Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in AGRICULTURE*. 2020; 3 (8): 53–62. (In Russ.)
8. Zambrini A. V., Donati E., Russo C., Pizzichini D. Method for the production of lactose-free milk. Patent for invention RU 2766351 C2, 03/15/2022. Application 2019118566, bulletin No. 8. 25 p. (In Russ.)

9. Gorina T. A. Normative and technical documentation “Low-lactose and lactose-free drinking milk”. *Milk Processing*. 2022; 4 (270): 30–32. (In Russ.)
10. Khramtsov A. G., Anisimov S. V., Davydyants L. E., Skorokhodova M. V., Romakhova V. Yu., Zhilina M. A. Study of lactose isomerization in the dairy production process. *Dairy Industry*. 2023; 4: 67–70. DOI: 10.31515/1019-8946-2023-04-67-70. (In Russ.)
11. Loza N. V., Kutenko N. A., Brovkina M. A., Samkov A. A., Kruglova M. N. The effect of lactose on the transport properties of ion-exchange membranes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2023; 13 (4): 301–311. DOI: 10.31857/S2218117223040041. (In Russ.)
12. Dikhanbaeva F. T., Tasturganova E. C. Development of technology of bio-additives based on camel milk using yeast fermenting lactose. *Global Science and Innovations. Proceedings*. 2020: 284–286. (In Russ.)
13. Gorlova A. I., Ilyina A. M. The physiological role of lactose in native and hydrolyzed milk: review. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022; 84 (2): 57–61. (In Russ.)
14. Topnikova E. V., Ivanova N. V., Mordvinova V. A. Directions of rational use of buttermilk in the production of dairy products. *Cheesemaking and Buttermaking*. 2022; 6: 42–45. DOI: 10.31515/2073-4018-2022-6-42-45. (In Russ.)
15. Lozovskaya D. S., Dymar O. V. Technological properties of cow colostrums. *Dairy Industry*. 2022; 1: 55–57. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-01-55-57. (In Russ.)
16. Slavorosova E. V., Shevchuk V. B., Fialkova E. A., Goldenshlach O. N., Nechaev K. A. A promising way of processing whey. *Dairy Industry*. 2022; 12: 14–16. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-12-14-16. (In Russ.)
17. Ivory R., Mangan D., McCleary B. V. Lactose concentration in low-lactose and lactose-free milk, milk products, and products containing dairy ingredients by high sensitivity enzymatic method (K-lolac), collaborative study: final action 2020.08. *Journal of AOAC International*. 2022; 105 (6): 1617–1624. DOI: 10.1093 /jaoacint / qsac070.
18. Gilibert-Oriol G. Ultrafiltration membrane cleaning processes: optimization in seawater desalination plants. De Gruyter, 2021. 104 p. DOI: 10.1515/9783110715149.
19. Kashaninejad M., Razavi S. M. A. The effect of pH and NaCl on the diafiltration performance of camel milk. *International Journal of Dairy Technology*. 2021; 74 (3): 2431–2438. DOI: 10.1111/1471-0307.12774.
20. Shinde G. P., Kumar R., Reddy K. R., Nadanasabhapathi S., Dutt Semwal A. Effect of pulsed electric field processing on reduction of sulfamethazine residue content in milk. *Journal of Food Science and Technology*. 2022; 59 (5): 1931–1938. DOI: 10.1007/s13197-021-05207-0.

Authors' information:

Irina M. Donnik, academician of the Russian Academy of Sciences, honorary worker of higher education of the Russian Federation, doctor of biological sciences, professor, head of the department of infectious and non-infectious pathology, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia, ORCID 0000-0002-8593-7470, AuthorID 313786. *E-mail: imdonnik@presidium.ras.ru*

Sergey G. Mayzel, doctor of technical sciences, professor, director of the research institute of agro-economic development, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia, ORCID 0009-0000-3838-9961, AuthorID 768905. *E-mail: maizel_sg@urgau.ru*

Nikolay V. Burachevskiy, postgraduate of the department of infectious and non-infectious pathology, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0009-0003-1388-3818, AuthorID 1130827. *E-mail: nikolaburachevsky@mail.ru*