

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСМОТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПО СОСТАВУ РАСТВОРОВ НА ПРИМЕРЕ ПИЩЕВЫХ ВОДНЫХ СРЕД

В. А. ТИМКИН, кандидат технических наук, доцент, профессор,
Уральский государственный аграрный университет
(620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42; e-mail: ural.membrana@yandex.ru)

Ключевые слова: осмотическое давление, обратный осмос, плодоовощные соки, молочная сыворотка, лактоза, ультрафильтрация, концентрат, пермеат.

В данной статье рассмотрены вопросы определения осмотического давления пищевых сред на примере плодоовощных соков, молочной сыворотки и лактозы. Приведены разработанная автором методика определения осмотического давления, а также полученные результаты. Показано, что предпочтительным методом определения осмотического давления для пищевых сред является динамический метод. Однако применение этого метода на практике требует соблюдения некоторых особенностей, присущих процессу обратного осмоса и чрезвычайно сложной структуре исследуемого продукта. Учет этих особенностей потребовал разработки научно обоснованной методики проведения экспериментов для определения осмотического давления сложных по составу пищевых сред. Предлагается экспериментально построить зависимость $V(P)$ и продлить линейные участки графика до пересечения с осью давления. Установлено, что осмотическое давление плодоовощных соков имеет величины, находящиеся между значениями осмотического давления глюкозы и сахарозы. Более высокое значение осмотического давления имеют соки с большим содержанием глюкозы (черносмородиновый и яблочный), меньшие значения – у соков с большим содержанием сахарозы (морковный и свекольный). Показано, что осмотическое давление творожной и подсырной сыворотки близко по своим значениям. Небольшое расхождение обусловлено тем, что творожная сыворотка содержит больше минеральных веществ, оказывающих существенное влияние на осмотическое давление раствора. Показано, что осмотическое давление лактозы, полученной из творожной и подсырной сыворотки, практически одинаковое. Анализ приведенных зависимостей показал, что осмотическое давление пищевых сред имеет тенденцию резкого роста при концентрации выше 20–25 % СВ. Этот фактор, на наш взгляд, необходимо учитывать при выборе оборудования для промышленных мембранных установок. Определено, что при увеличении концентрации пищевых сред можно добиться такого значения осмотического давления, при котором создаются неблагоприятные условия для развития микроорганизмов.

DETERMINATION OF THE OSMOTIC PRESSURE OF COMPLEX SOLUTIONS ON THE EXAMPLE OF FOOD AQUATIC ENVIRONMENTS

V. A. TIMKIN, candidate of technical sciences, associate professor, professor,
Ural State Agrarian University
(42 K. Liebknehta, 620075, Ekaterinburg; e-mail: ural.membrana@yandex.ru)

Keywords: osmotic pressure, reverse osmosis, fruit and vegetable juices, whey, lactose, ultrafiltration, concentrate, permeate.

This article discusses the definition of osmotic pressure of food environments on the example of fruit and vegetable juices, whey and lactose. The method of determination of osmotic pressure, developed by the author, as well as the results obtained are presented. It is shown that the most preferred method of determining the osmotic pressure for food media is a dynamic method. However, the application of this method in practice requires compliance with some features inherent in the reverse osmosis process and extremely complex structure of the product under study. Taking into account these features required the development of a scientifically based methodology for experiments to determine the osmotic pressure of complex composition of food media. To determine the osmotic pressure, it is proposed to experimentally construct a dependence $V(P)$, and extend the linear sections of the graph to the intersection with the pressure axis. It is determined that the osmotic pressure of fruit and vegetable juices has values between the values of the osmotic pressure of glucose and sucrose. Juices with a high glucose content (blackcurrant and apple), juices with a high sucrose content (carrot and beet) have a higher value of osmotic pressure. It is shown that the osmotic pressure of the curd and cheese whey are close in their values. A slight discrepancy is due to the fact that the curd serum contains more minerals that have a significant impact on the osmotic pressure of the solution. It is shown that the osmotic pressure of lactose, obtained from cheese curd and whey, almost identical in their values. The analysis of the above dependences showed that the osmotic pressure of food media tends to rise sharply at concentrations above 20–25 % SV. This factor, in our opinion, should be taken into account when choosing equipment for industrial membrane plants. It is determined that by increasing the concentration of food media, it is possible to achieve such a value of osmotic pressure, which creates unfavorable conditions for the development of microorganisms.

Положительная рецензия представлена Г. Б. Пищиковым, доктором технических наук,
профессором Уральского государственного экономического университета.

Для осуществления разделения методами обратного осмоса, нанофильтрации, а в некоторых случаях и ультрафильтрации (при большой концентрации высокомолекулярных соединений [1]) необходимо, чтобы давление в системе превышало осмотическое давление раствора (пищевая водная среда), предназначенного для разделения [1, 2]. Знание осмотического давления позволяет научно обоснованно подходить к вопросам длительного хранения пищевых продуктов. Опубликованных данных по осмотическому давлению пищевых сред мало [2–4], к тому же, как отмечают отдельные авторы, вследствие колебаний состава натуральных продуктов результаты точных измерений, полученных для одного образца, можно использовать для другого образца той же самой составной части продукта как приближенные значения [1, 2]. Исключения составляют рафинированные сахара – одни из немногих веществ, для которых имеются надежные данные (рис. 1) [2].

Цель и методика исследований. Осмотическое давление растворов различной структуры может быть определено как теоретическими (расчетными), так и экспериментальными методами. При этом следует отметить, что расчет осмотического давления растворов неэлектролитов по имеющимся зависимостям [1, 7–9] сопряжен со значительными трудностями по определению величин, входящих в уравнения, и практически непригоден для многокомпонентных растворов, к которым относятся пищевые среды [1, 3, 5, 6]. Анализ экспериментальных методов определения осмотического давления [1, 6, 10–12] пока-

зал, что наиболее предпочтительным методом (для пищевых сред) является динамический метод [1].

Однако применение этого метода на практике требует соблюдения некоторых особенностей, присущих процессу обратного осмоса и чрезвычайно сложной структуре исследуемого продукта [3] (в качестве пищевой среды рассмотрен сок столовой свеклы, для других продуктов закономерности имеют схожий характер). Это такие факторы, как концентрационная поляризация, выход мембраны на стационарный режим работы, тщательная предварительная подготовка продукта и т. д. К тому же, как показали проведенные эксперименты и теоретические предпосылки [13, 14], прямой осмос в системе «раствор – мембрана – растворитель» при использовании синтетических мембран (ацетатцеллюлозных, полиамидных), практически невозможен, так как при отсутствии перепада давления на мембране, а значит, и отсутствии течения пермеата через мембрану происходит выравнивание концентраций раствора (C_0) и растворителя (C_2) за счет диффузии растворенных веществ через поры мембраны (рис. 2) [14]. Исходя из этого представляется маловероятным построение зависимости скорости V потока пермеата от давления P , прикладываемого к раствору, при котором график $V(P)$ пересекал бы ось давления, переходя из области прямого осмоса в область обратного осмоса, и отсекал на ней величину осмотического давления раствора π . Учет этих особенностей потребовал разработки научно обоснованной методики проведения экспериментов для определения осмотического давления сложных по составу пищевых сред.

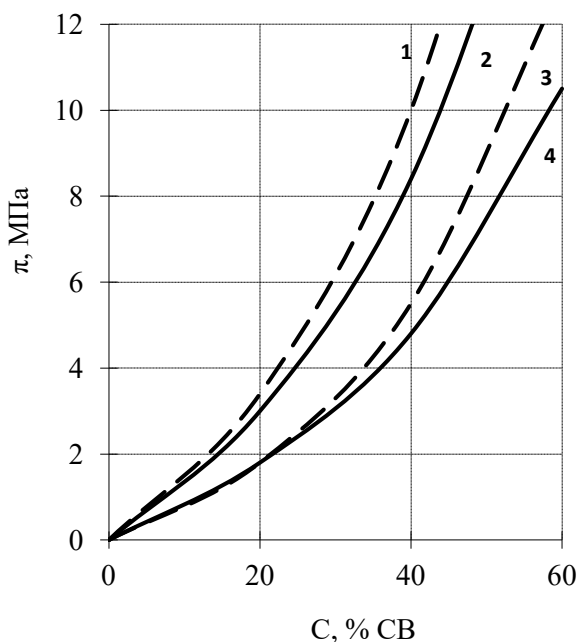


Рис. 1. Значения осмотического давления π для растворов глюкозы (1, 2) и сахарозы (3, 4) от концентрации сухих растворенных веществ C при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [2]. 1, 3 – опытные данные; 2, 4 – расчетные значения по уравнению Вант-Гоффа

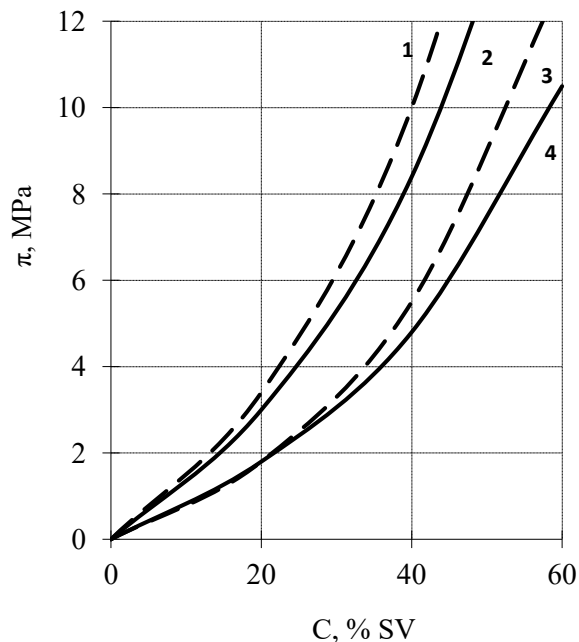


Fig. 1. Values of osmotic pressure π for glucose solutions (1, 2) and sucrose (3, 4) from the concentration of dry dissolved substances C , at $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [2]. 1, 3 – experimental data; 2, 4 – calculated values from the Van't-Hoff equation

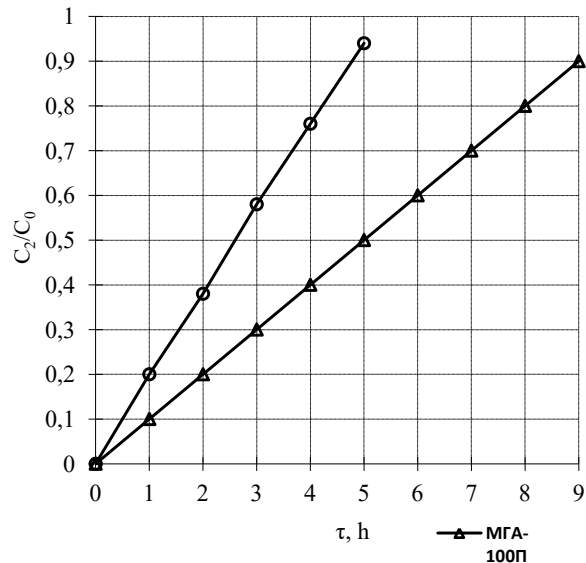
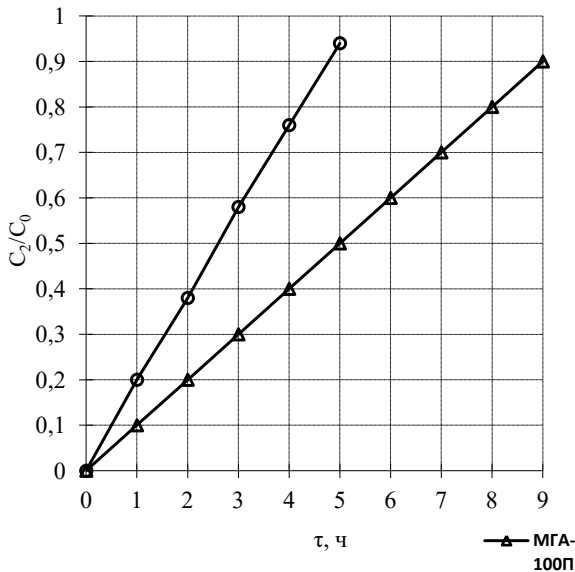


Рис. 2. Зависимость изменения отношения C_2/C_0 от времени τ для свекольного сока при $V = 0$, $C_0 = 15\% \text{ СВ}$, $t = 20^\circ\text{C}$ [14]

Fig. 2. Dependence of the ratio C_2/C_0 on the time τ for beet juice at $V = 0$, $C_0 = 15\% \text{ SV}$, $t = 20^\circ\text{C}$ [14]

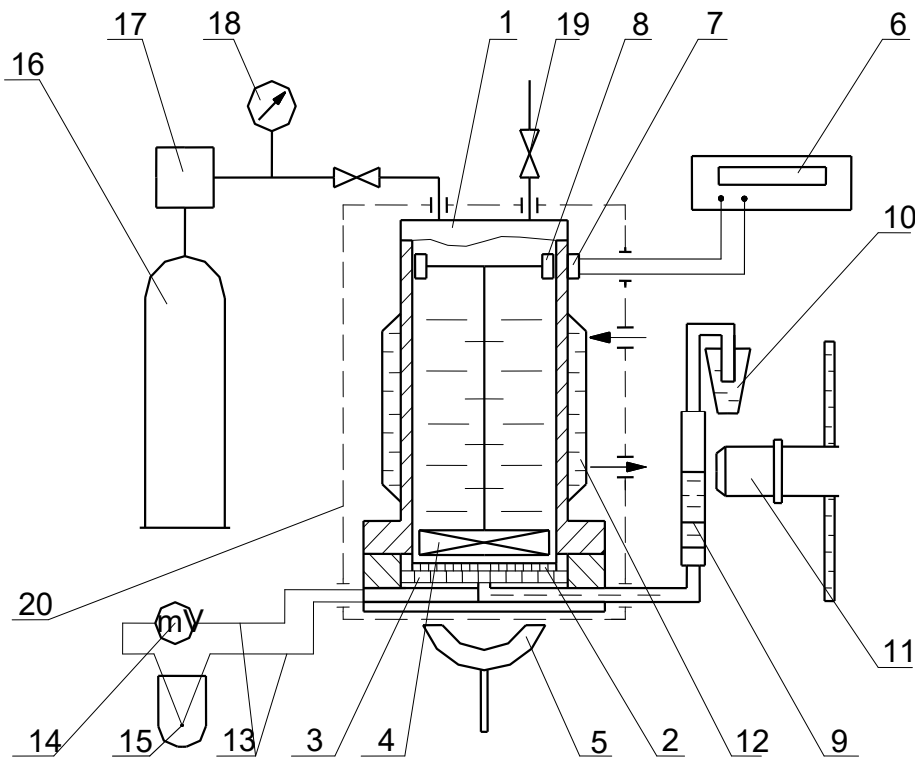


Рис. 3. Схема лабораторной мембранной установки для определения осмотического давления пищевых сред. 1 – обратноосмотическая ячейка; 2 – мембрана; 3 – подложка; 4 – перемешивающий стержень; 5 – магнитная мешалка; 6 – частотомер; 7 – индукционный датчик; 8 – магнит; 9 – стеклянная трубка; 10 – сборник пермеата; 11 – микроскоп; 12 – рубашка; 13 – терморпара; 14 – милливольтметр; 15 – сосуд Дьюара; 16 – баллон; 17 – редуктор; 18 – манометр; 19 – штуцер; 20 – термостат

Figure 3. Scheme of laboratory membrane unit for determination of food media osmotic pressure. 1 – the laboratory unit reverse osmosis; 2 – membrane; 3 – substrate; 4 – stirring rod; 5 – magnetic stirrer; 6 – frequency counter; 7 – induction sensor; 8 – magnet; 9 – glass tube; 10 – permeate collector; 11 – microscope; 12 – jacket; 13 – thermocouple; 14 – millivolt; 15 – Dewar; 16 – tank; 17 – gear; 18 – manometer; 19 – choke; 20 – thermostat

Эксперименты осуществлялись на лабораторной установке (рис. 3) с использованием обратноосмотической мембраны МГА–100П (ацетатцеллюлозная с ассиметричной структурой) производства ЗАО НТЦ «Владипор» при температуре 20 °С.

Как показали исследования [3, 14], зависимость $V(P)$ имеет участки, подчиняющиеся закону Пуазей-

ля (рис. 4). Если допустить, что перепад давления при высокой селективности мембран может быть определен как разность рабочего давления P и осмотического давления π , значение π определяется в точке пересечения графиком $V(P)$ оси давления [15–18].

Таким образом, для определения осмотического давления таких растворов, как пищевые среды,

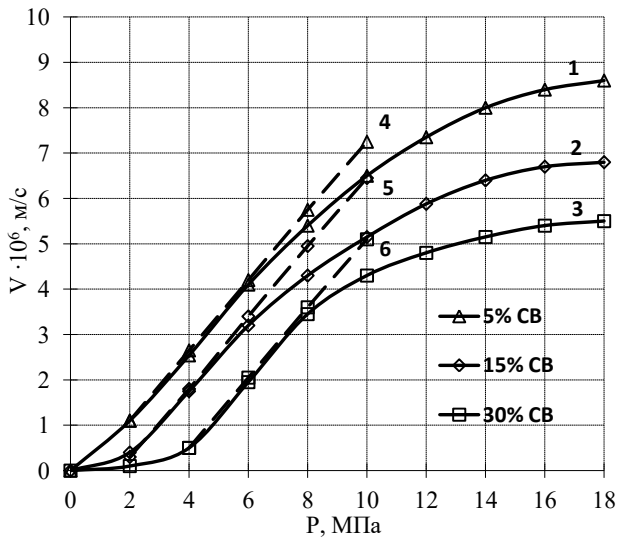


Рис. 4. Зависимость скорости потока пермеата V от рабочего давления P в процессе разделения свекольного сока при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [14].
1, 2, 3 – экспериментальные значения;
4, 5, 6 – расчетные значения по уравнению Пуазейля

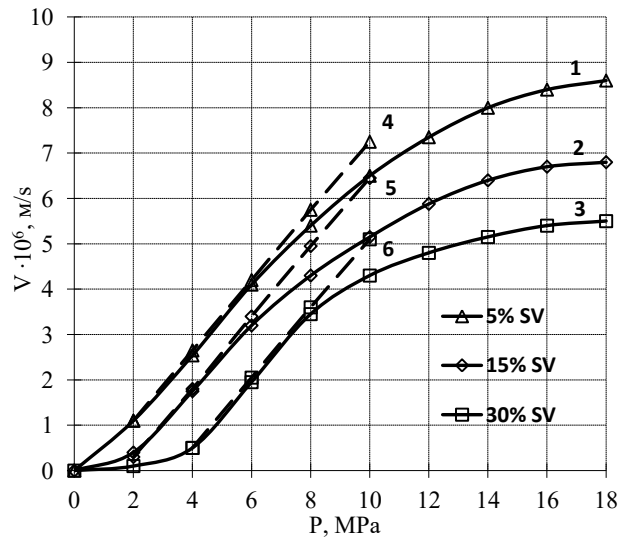


Fig. 4. The dependence of the permeate flow rate V of the operating pressure P in the separation process of beet juice at $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [14].
1, 2, 3 – experimental values;
4, 5, 6 – calculated values from the Poiseuille equation

предлагается экспериментально построить зависимость $V(P)$ и продлить линейные участки графика до пересечения с осью давления. На наш взгляд, это практически единственный способ экспериментального определения осмотического давления. Следует отметить, что значения осмотического давления, определяемые данным методом, соответствуют концентрации C_1 .

Как упоминалось выше, необходимо учитывать некоторые факторы для получения корректных результатов. Так, для построения линейных участков зависимости $V(P)$ надо поддерживать в экспериментах постоянное значение концентрационной поляризации C_1/C_0 , где C_1 – концентрация раствора у поверхности мембраны. Проведенный анализ процессов переноса в пограничном слое системы «пищевая среда – мембрана» показал, что отношение C_1/C_0 определяется такими параметрами, как скорость V потока пермеата, селективность мембраны ϕ по отношению к растворенным веществам в продукте и коэффициент массоотдачи β от поверхности мембраны в объем исследуемого раствора [3, 14].

Значение концентрационной поляризации C_1/C_0 рассчитывалось по уравнению:

$$C_1/C_0 = \exp(V \phi / \beta) \quad (1)$$

Скорость V потока пермеата измерялась с помощью микроскопа при движении пермеата в стеклянной трубке диаметром 5 мм (рис. 3) с учетом отношения площади сечения трубки S и площади сечения пор мембраны F . Принималось $F = F_0 m$, где F_0 – площадь мембраны; $m = 0,65$ – пористость мембраны [1]. При определении скорости V потока пермеата учитывалось время t , соответствующее выходу мембраны на стационарный режим, за которое формируется профиль концентраций у входа в поры мембраны. Поскольку по результатам исследова-

ний [13] наиболее продолжительным является время преодоления потенциального барьера, t определялось по уравнению:

$$t = D/V^2 \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии растворенных веществ в растворе.

Исследования [3, 14, 19] показали, что в области скоростей потока пермеата, подчиняющихся закону Пуазейля, селективность обратноосмотической мембраны МГА–100П практически не зависит от концентрации C_0 в пределах от 5 % до 50 % СВ и остается на уровне $\phi = 0,975\text{--}0,980$. Поэтому для последующих расчетов принималось $\phi = 0,975$.

При проведении экспериментов создавались такие гидродинамические условия, при которых отношение C_1/C_0 поддерживалось на уровне $C_1/C_0 = 1,07\text{--}1,12$. Практически это достигалось увеличением числа оборотов магнитной мешалки (рис. 3) при повышающейся скорости потока пермеата, что влияло на пограничный слой и, как следствие, на коэффициент массоотдачи β . Последний, как показали исследования [3, 14, 19], может быть рассчитан из критерия Шервуда $Sh = \beta d / D$ по уравнению:

$$Sh = 0,52 Re^{0,62} (Sc b/2L)^{0,35} \quad (3)$$

где $Re = v d \rho / \mu$ – критерий Рейнольдса; $Sc = \mu / (D \rho)$ – критерий Шмидта; b – ширина канала; L – длина канала, v – скорость течения раствора вдоль канала (мембраны); $d = 2 b$ – эквивалентный диаметр канала; ρ – плотность раствора; μ – коэффициент динамической вязкости раствора.

Полученные из графика $V(P)$ (рис. 5) значения осмотического давления π_0 , соответствующие концентрации раствора C_1 , требуют уточнений, так как селективность используемой в экспериментах мембраны $\phi \neq 1$ и пермеат содержит в небольших количествах растворенные вещества. Уточненное зна-

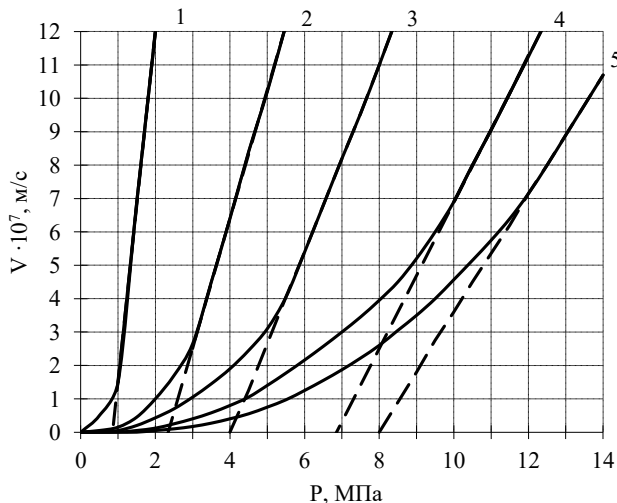


Рис. 5. Определение осмотического давления π_0 свекольного сока, значение $C_1/C_0 = 1,08$.
 1 - $C_0 = 9,3\%$ CB; 2 - $C_0 = 21,1\%$ CB; 3 - $C_0 = 32,4\%$ CB;
 4 - $C_0 = 41,7\%$ CB; 5 - $C_0 = 46,3\%$ CB

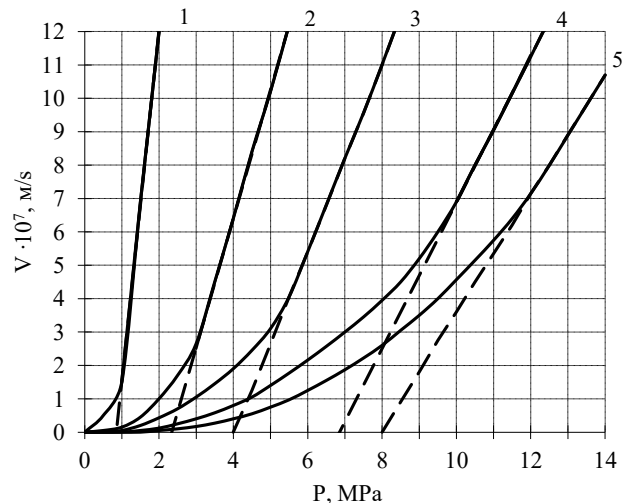


Fig. 5. Determination of the osmotic pressure π_0 beet juice, the value of $C_1/C_0 = 1,08$.
 1 - $C_0 = 9,3\%$ SV; 2 - $C_0 = 21,1\%$ SV; 3 - $C_0 = 32,4\%$ SV;
 4 - $C_0 = 41,7\%$ SV; 5 - $C_0 = 46,3\%$ SV

чение осмотического давления π определялось по уравнению [15]:

$$\pi = \pi_0 / \varphi^2 \quad (4).$$

Описанная выше методика определения осмотического давления позволяет, на наш взгляд, получать корректные результаты для сложных по составу пищевых сред.

Результаты исследований. Ниже приведены результаты определения осмотического давления плодово-овощных соков, молочной сыворотки и лактозы. Отмечены особенности подготовки растворов перед экспериментом, приведен анализ полученных результатов.

При определении осмотического давления плодово-овощных соков в качестве исследуемых сред использовались соки столовой свеклы, черной смородины, яблок и моркови, получаемые прессованием плодов, а также водные экстракты из жома. Диапазон химического состава этих соков охватывает практически все известные виды плодово-овощных соков [20, 21].

Известно, что перед обратноосмотическим разделением (определением осмотического давления) обрабатываемую среду необходимо тщательно подготовить – очистить от дисперсной фазы, коллоидных и высокомолекулярных соединений [1]. Для плодово-овощных соков это имеет особое значение, так как проведенные нами эксперименты с неосветленными соками показали, что наряду с образованием на поверхности мембраны осадка в виде слоя геля и снижением проницаемости мембраны возникает эффект объемного гелеобразования сока [3, 14]. Это приводит к резкому повышению вязкости (более чем на порядок) и, как следствие, к ухудшению характеристик мембраны. С учетом данной особенности исходный сок фильтровался через пористую перегородку с диаметром пор ≈ 10 мкм, затем проводилась ультрафильтрация через мембрану УФМ-50, что позволило получить качественный осветленный сок.

Результаты определения осмотического давления плодово-овощных соков приведены на рис. 6. Эксперименты осуществлялись при температуре 20 °С.

Анализ зависимости $\pi(C)$ (рис. 6) показал, что осмотическое давление плодово-овощных соков имеет величины, находящиеся между значениями осмотического давления глюкозы и сахарозы. При рассмотрении химического состава соков [19, 20] было определено, что более высокое значение осмотического давления имеют соки с большим содержанием глюкозы (черносмородиновый и яблочный), меньшие значения π у соков с большим содержанием сахарозы (морковный и свекольный). Можно утверждать, что значение осмотического давления плодово-овощных соков в первую очередь определяется содержанием в них таких компонентов, как глюкоза и сахароза.

Следует отметить, что приведенные результаты относятся к сокам, приготовленным из свежих плодов, а также что осмотическое давление имеет осредненные значения из-за колебания состава исходных продуктов. Эксперименты показали, что осмотическое давление соков, приготовленных из лежалых плодов, имеет значения на 3–7 % выше по сравнению со «свежими» соками, что в первую очередь объясняется повышенной вязкостью таких соков и, как следствие, пониженными значениями коэффициента диффузии. Естественное отклонение состава продуктов, зависящее от многочисленных природных и других факторов, приводит к изменению осмотического давления на 2–5 %, что позволяет, по нашему мнению, использовать на практике осредненные значения осмотического давления.

При определении осмотического давления молочной сыворотки в качестве исследуемых сред использовалась свежая творожная и подсырная сыворотка, соответствующая ГОСТ Р 53438-2009 (табл. 1).

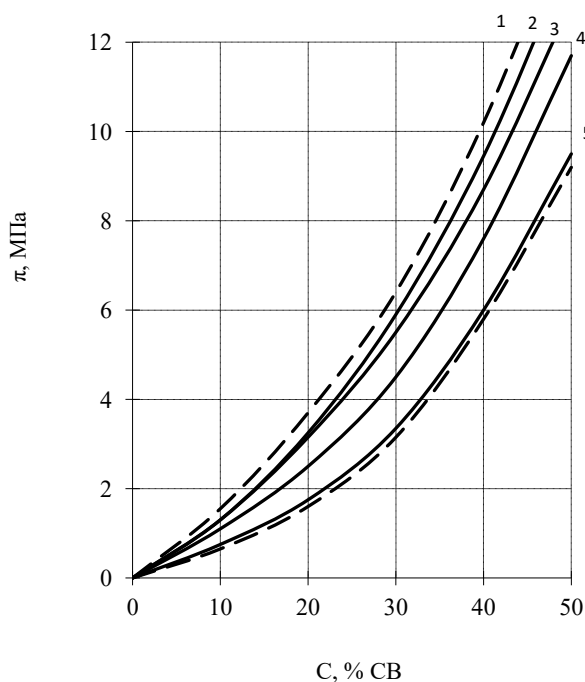


Рис. 6. Зависимость осмотического давления плодовоовощных соков π от концентрации сухих растворенных веществ C при $t = 20^\circ\text{C}$.
1 – глюкоза; 2 – черносмородиновый сок; 3 – яблочный сок; 4 – морковный сок; 5 – свекольный сок; 6 – сахароза

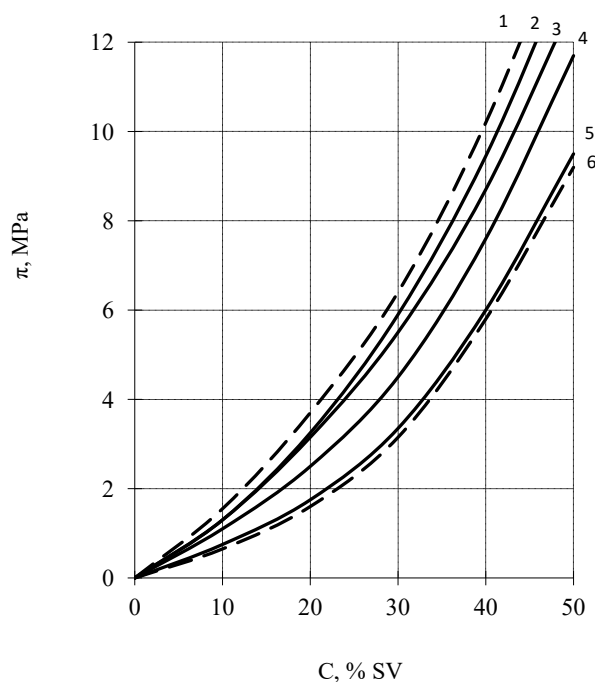


Fig. 6. Dependence of osmotic pressure of fruit and vegetable juices π on the concentration of dry dissolved substances C at $t = 20^\circ\text{C}$.
1 – glucose; 2 – blackcurrant juice; 3 – apple juice; 4 – carrot juice; 5 – beet juice; 6 – sucrose

Таблица 1
Состав молочной сыворотки (средние значения)

Table 1
Composition of whey (average values)

| Параметры <i>Characteristic</i> | Сыворотка творожная <i>Serum curd</i> | Сыворотка подсырная <i>Serum cheese</i> |
|--|--|--|
| Белок общий, % <i>Protein total, %</i> | 0,93 | 0,71 |
| Лактоза, % <i>Lactose, %</i> | 4,27 | 4,93 |
| Жир, % <i>Fat, %</i> | 0,35 | 0,12 |
| Минеральные вещества, % <i>Mineral substance, %</i> | 0,65 | 0,61 |
| СВ, % <i>SV, %</i> | 6,20 | 6,37 |

Так как осмотическое давление растворов зависит от концентрации низкомолекулярных веществ [1], можно утверждать, что осмотическое давление молочной сыворотки обусловлено веществами, находящимися в ней в состоянии истинного раствора: это лактоза и ионы солей (хлориды и фосфаты натрия, калия и т. д.). В связи с этим для успешного проведения эксперимента осуществлялась предварительная подготовка сыворотки на опытной установке с использованием керамических ультрафильтрационных мембран КУФЭ-19 (0,02) производства ООО «НПО „Керамикфильтр“». Эти мембраны позволяют эффективно выделить из исходной сыворотки белковую и жировую фракции, наличие которых в эксперименте существенно снижает проницаемость обратноосмотической мембраны за счет образования слоя геля на ее поверхности [19]. Опре-

деление осмотического давления осуществлялось в экспериментах с пермеатом (табл. 2). Эксперименты проводились при температуре 20°C .

Исследования показали, что осмотическое давление творожной и подсырной сыворотки близки по значениям. Небольшое расхождение обусловлено, на наш взгляд, тем, что творожная сыворотка содержит больше минеральных веществ, оказывающих существенное влияние на осмотическое давление раствора. Такое несущественное расхождение значения осмотического давления позволяет объединить результаты исследований, рассматривая два вида сыворотки как один продукт – молочную сыворотку (рис. 7).

Естественное отклонение состава молочной сыворотки, зависящее от многочисленных природных и производственных факторов, приводит к измене-

Показатели исходного и конечного продуктов после ультрафильтрации (средние значения)
Table 2

Indicators of initial and final products after ultrafiltration (mean values)

| Параметры Characteristic | Сыворотка творожная Serum curd | | Сыворотка подсырная Serum cheese | |
|---|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| | Концентрат Concentrate | Пермеат Permeate | Концентрат Concentrate | Пермеат Permeate |
| Белок общий, % Protein total, % | 8,45 | 0,0 | 6,82 | 0,0 |
| Лактоза, % Lactose, % | 4,27 | 4,25 | 4,92 | 4,95 |
| Жир, % Fat, % | 3,30 | 0,0 | 1,04 | 0,0 |
| Минеральные вещества, % Mineral substance, % | 0,70 | 0,65 | 0,67 | 0,61 |
| СВ, % SV, % | 16,72 | 4,90 | 13,45 | 5,56 |

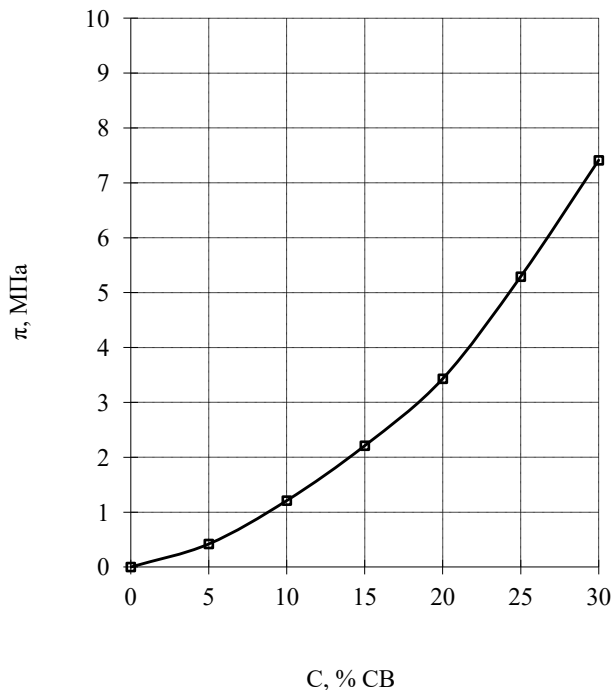


Рис. 7. Зависимость осмотического давления молочной сыворотки π от концентрации сухих растворенных веществ C при $t = 20^\circ\text{C}$

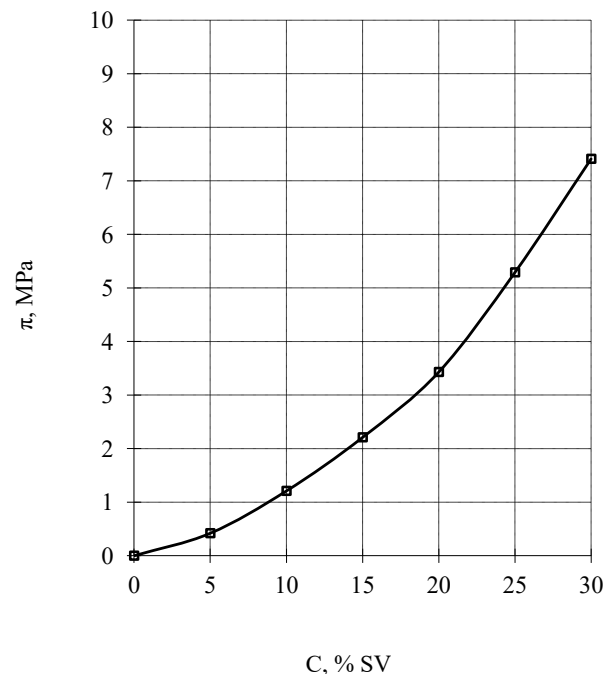


Fig. 7. Dependence of osmotic pressure of milk whey π on the concentration of dry dissolved substances C at $t = 20^\circ\text{C}$

нию осмотического давления на 3–5 %, что позволяет, по нашему мнению, использовать на практике полученные результаты.

Определение осмотического давления лактозы осуществлялось в экспериментах с водным раствором лактозы, полученным из ультрафильтрата творожной и подсырной сыворотки путем нанофильтрации и последующей диафильтрации (табл. 3) [22]. Эксперименты проводились при температуре 20°C .

Исследования показали, что осмотическое давление лактозы, полученной из творожной и подсырной сыворотки, практически одинаковое. Это позволило объединить результаты экспериментов (рис. 8).

Выводы. Из приведенных зависимостей $\pi(C)$ (рис. 6, 7, 8) видно, что осмотическое давление пищевых сред имеет тенденцию резкого роста при кон-

центрации выше 20–25 % СВ. Этот фактор, на наш взгляд, необходимо учитывать при выборе оборудования для промышленных мембранных установок.

Известно, что внутриклеточное давление микроорганизмов составляет в среднем 0,6 МПа [23]. Следовательно, при осмотическом давлении пищевых сред в диапазоне 0,5–1,0 МПа создаются оптимальные условия для их жизнедеятельности и развития, что приводит к быстрой порче продуктов при хранении. Увеличивая концентрацию пищевых сред можно добиться такого значения осмотического давления, при котором создаются неблагоприятные условия для развития микроорганизмов. Для плодовоовощных соков, молочной сыворотки и раствора лактозы это будут, по-видимому, концентрации выше 15–20 % СВ.

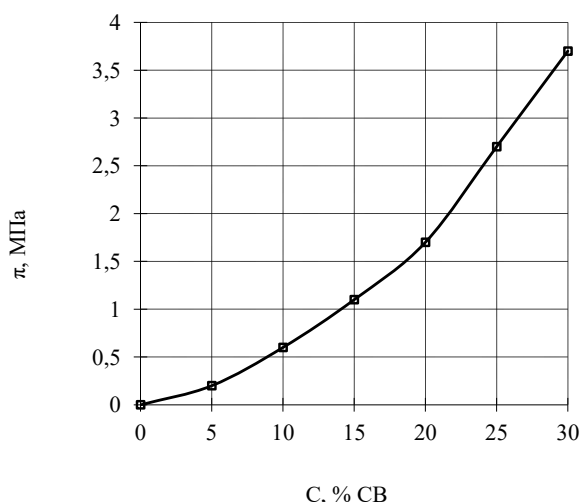


Рис. 8. Зависимость осмотического давления лактозы π от концентрации сухих растворенных веществ C при $t = 20^\circ\text{C}$

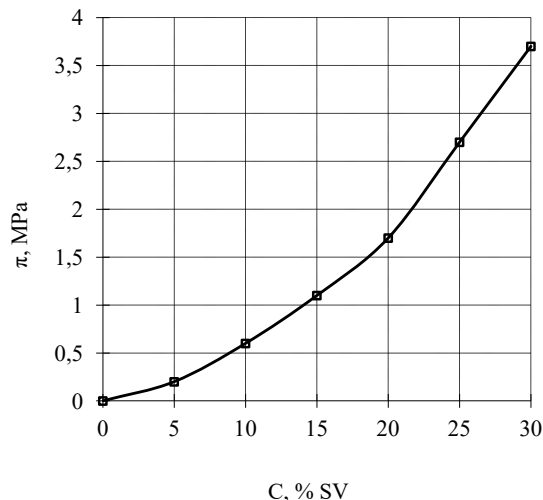


Fig. 8. Dependence of osmotic pressure of lactose π on the concentration of dry dissolved substances C at $t = 20^\circ\text{C}$

Таблица 3
Показатели водного раствора лактозы (средние значения)
Table 3
Lactose aqueous solution values (mean values)

| Параметры <i>Characteristic</i> | Водный раствор лактозы (сыворожка творожная) <i>An aqueous solution of lactose (whey curd)</i> | Водный раствор лактозы (сыворожка подсырная) <i>An aqueous solution of lactose (whey cheese)</i> |
|--|--|--|
| Белок общий, % <i>Protein total, %</i> | 0,04 | 0,04 |
| Лактоза, % <i>Lactose, %</i> | 17,25 | 20,35 |
| Жир, % <i>Fat, %</i> | 0,00 | 0,00 |
| Минеральные вещества, % <i>Mineral substance, %</i> | 0,01 | 0,01 |
| СВ, % <i>SV, %</i> | 17,30 | 20,40 |

Литература

1. Тимкин В. А., Лазарев В. А. Определение осмотического давления многокомпонентных растворов пищевой промышленности // Мембраны и мембранные технологии. 2015. Т. 5. № 1. С. 48–56.
2. Timkin V. A., Lazarev V. A. Determination of the Osmotik Pressure of Multikomponent Solutions in the Food Industri // Petroleum Chemistry. Vol. 55. № 4. 2015. P. 301–307.
3. High Pressure Membrane Filtration for Dairy Applications. GEA Process Engineering. North Central Cheese Industries Association Annual Conference [Электронный ресурс]. October 12–13, 2014.
4. Montaña M., Camacho A., Serrano I., Vallés I., Devesa R., Matia L. Removal of radionuclides in drinking water by membrane treatment using ultrafiltration, reverse osmosis and electro dialysis reversal // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Т. 125. P. 86–92.
5. Shen M., Keten S., Lueptow R.M. Dynamics of water and solute transport in polymeric reverse osmosis membranes via molecular dynamics simulations // Journal of Membrane Science. 2016. Т. 506. P. 95–108.
6. Ferrando Chavez D. L., Nejidat A., Herzberg M. Viscoelastic properties of extracellular polymeric substances can strongly affect their washing efficiency from reverse osmosis membranes // Environmental Science and Technology. 2016. Т. 50. № 17. P. 9206–9213.
7. Ilame S. A., Singh S. V. Application of membrane separation in fruit and vegetable juice processing: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2015. Т. 55. № 7. P. 964–987.
8. Bhattacharjee C., Saxena V. K., Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: a review // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2017. Т. 43. P. 136–153.

9. Bogler A., Bar-Zeev E., Lin S. Biofouling of membrane distillation, forward osmosis and pressure retarded osmosis: principles, impacts and future directions // *Journal of Membrane Science*. 2017. Т. 542. Р. 378–398.
10. Тимкин В. А., Лазарев В. А., Минухин Л. А. Баромембранная технология переработки молочной сыворотки как фактор продовольственной безопасности региона // *Известия Уральского гос. экономического университета*. 2013. № 3-4. С. 130–135.
11. Fu F.-J., Zhang S., Sun S.-P., Chung T.-S., Wang K.-Y. Poss-containing delamination-free dual-layer hollow fiber membranes for forward osmosis and osmotic power generation // *Journal of Membrane Science*. 2013. Т. 443. Р. 144–155.
12. Antony A., Leslie G., Chilcott T., Coster H. In situ structural and functional characterization of reverse osmosis membranes using electrical impedance spectroscopy // *Membrane Science*. 2013. Т. 425–426. Р. 89–97.
13. Zaidi S. M. J., Fadhillah F., Khan Z., Ismail A. F. Salt and water transport in reverse osmosis thin film composite seawater desalination membranes // *Desalination*. 2015. Т. 368. Р. 202–213.
14. Лазарев С. И., Головин Ю. М., Мицул И. П., Никитенков Д. О., Поликарпов В. М., Хорохорина И. В., Холодидин В. Н. Исследование электрокинетических характеристик обратноосмотических полупроницаемых мембран в водных растворах гидрокарбоната натрия // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 3. С. 525–529.
15. К теории мембранного разделения растворов. Постановка задачи и решение уравнений переноса / Г. А. Мартынов, В. М. Старов, Н. В. Чураев // *Коллоидный журнал*. 2015. № 3. С. 489–499.
16. К теории мембранного разделения растворов. Анализ полученных решений / Г. А. Мартынов, В. М. Старов, Н. В. Чураев // *Коллоидный журнал*. 2015. № 4. С. 657–664.
17. Теория разделения растворов методом обратного осмоса / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Г. А. Мартынов, В. М. Старов // *Химия и технология воды*. 2014. № 2. С. 99–104.
18. Тимкин В. А., Лазарев В. А., Минухин Л. А. Определение осмотического давления молочной сыворотки // *Аграрный вестник Урала*. 2014. № 3.
19. Химический состав пищевых продуктов. Справочные таблицы / под ред. И. М. Скурихина, М. Н. Волгарева. 2-е изд. М. : Агропромиздат, 2013. 224 с.
20. Самсонова А. Н., Ушева В. Б. Фруктовые и овощные соки (Техника и технология). 2-е изд., перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 2015. 287 с.
21. Тимкин В. А., Мазина О. А., Пищиков Г. Б. Разработка нанобиомембранной технологии производства лактозы как фактор продовольственной безопасности Уральского региона // *Известия Уральского гос. экономического университета*. 2014. № 3-4.
22. Технология молока и молочных продуктов / Г. Н. Крусь, А. Г. Храмцов, З. В. Волокитина, С. В. Карпычев; под ред. А. М. Шалыгиной. М. : КолосС, 2016. 455 с.

References

1. Timkin V. A., Lazarev V. A. Determination of the osmotic pressure of multi-component solutions for the food industry // *Membranes and membrane technology*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 48–56.
2. Timkin V. A., Lazarev V. A. Determination of the Osmotik Pressure of Multikomponent Solutions in the Food Industri // *Petroleum Chemistry*. Vol. 55. No. 4. 2015. P. 301–307.
3. High Pressure Membrane Filtration for Dairy Applications. GEA Process Engineering. North Central Cheese Industries Association Annual Conference [Electronic source]. October 12–13, 2014.
4. Montaña M., Camacho A., Serrano I., Vallés I., Devesa R., Matia L. Removal of radionuclides in drinking water by membrane treatment using ultrafiltration, reverse osmosis and electro dialysis reversal // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Т. 125. Р. 86–92.
5. Shen M., Keten S., Lueptow R.M. Dynamics of water and solute transport in polymeric reverse osmosis membranes via molecular dynamics simulations // *Journal of Membrane Science*. 2016. Т. 506. Р. 95–108.
6. Ferrando Chavez D. L., Nejjidat A., Herzberg M. Viscoelastic properties of extracellular polymeric substances can strongly affect their washing efficiency from reverse osmosis membranes // *Environmental Science and Technology*. 2016. Т. 50. No. 17. P. 9206–9213.
7. Ilame S. A., Singh S. V. Application of membrane separation in fruit and vegetable juice processing: a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. Т. 55. No. 7. P. 964–987.
8. Bhattacharjee C., Saxena V. K., Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: a review // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017. Т. 43. P. 136–153.
9. Bogler A., Bar-Zeev E., Lin S. Biofouling of membrane distillation, forward osmosis and pressure retarded osmosis: principles, impacts and future directions // *Journal of Membrane Science*. 2017. Т. 542. Р. 378–398.

10. Timkin V. A., Lazarev V. A., Minukhin L. A. Baromembrane technology for milk whey processing as a factor of food security of the region // *News of the Ural State Economic University*. 2013. No. 3-4. P. 130–135.
11. Fu F.-J., Zhang S., Sun S.-P., Chung T.-S., Wang K.-Y. Poss-containing delamination-free dual-layer hollow fiber membranes for forward osmosis and osmotic power generation // *Journal of Membrane Science*. 2013. T. 443. P. 144–155.
12. Antony A., Leslie G., Chilcott T., Coster H. In situ structural and functional characterization of reverse osmosis membranes using electrical impedance spectroscopy // *Membrane Science*. 2013. T. 425–426. P. 89–97.
13. Zaidi S. M. J., Fadhillah F., Khan Z., Ismail A. F. Salt and water transport in reverse osmosis thin film composite seawater desalination membranes // *Desalination*. 2015. T. 368. P. 202–213.
14. Lazarev S. I., Golovin Yu. M., Mitul I. P., Nikitenkov D. O., Polikarpov V. M., Horohorina I. V., Holodilin V. N. Study of the electrokinetic characteristics of the Reverse osmosis semi-permeable membranes in aqueous solutions of sodium hydrogen carbonate // *Sorption and chromatographic processes*. 2014. T. 14. No. 3. P. 525–529.
15. To the theory of membrane separation of solutions. Statement of the problem and solution of transport equations / G. A. Martynov, V. M. Starov, N. V. Churaev // *Kolloidnyj Zhurnal*, 2015. No. 3. P. 489–499.
16. To the theory of membrane separation of solutions. Analysis of the obtained solutions / G. A. Martynov, V. M. Starov, N. V. Churaev // *Kolloidnyj Zhurnal*. 2015. No. 4. P. 657–664.
17. Theory of separation of solutions by reverse osmosis / B. V. Deryagin, N. V. Churaev, G. A. Martynov, V. M. Starov // *Chemistry and water technology*. 2014. No. 2. P. 99–104.
18. Timkin V. A., Lazarev V. A., Minukhin L. A. Determination of osmotic pressure of whey // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2014. No. 3.
19. Chemical composition of food products. Reference tables / ed. by I. M. Skurikhina, M. N. Volgareva. 2-e izd. M. : Agropromizdat, 2013. 224 p.
20. Samsonova A. N., Usheva V. B. Fruit and vegetable juices (Technique and technology). 2nd ed. M. : Agropromizdat, 2015. 287 p.
21. Timkin V. A., Mazin O. A., Pishchikov G. B. Development nanomembranes production technology of lactose as a factor of food security of the Ural region // *News of the Ural State Economic University*. 2014. No. 3-4.
22. Technology of milk and milk products / G. N. Kruse, A. G. Khramtsov, Z. V. Volokitina, S. V. Karpachev; ed. by A. M. Shalygina. M. : Colossus, 2016. 455 p.