

## Контроль активности воды в технологии лактолозосодержащей сыворотки

**Пономарева Елена Ивановна**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий»  
Адрес: 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19  
E-mail: elena6815@yandex.ru

**Титов Сергей Александрович**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий»  
Адрес: 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19  
E-mail: 125titov@mail.ru

**Жданов Всеволод Николаевич**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий»  
Адрес: 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19  
E-mail: sev1a@yandex.ru

**Губарева Юлия Павловна**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет  
инженерных технологий»  
Адрес: 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19  
E-mail: yuliya.gubareva.95@mail.ru

**Терещенко Дарина Анатольевна**

ООО «Домодедово Кэтеринг»  
Адрес: 142015, г. Домодедово,  
территория аэропорта «Домодедово», стр. 2  
E-mail: dasga2005@yandex.ru

Одним из основных способов обогащения молочной сыворотки пребиотическими веществами является модифицирование ее состава путем мембранной электрофлотации с последующей изомеризацией. В результате этих процессов происходит частичный переход содержащейся в сыворотке лактозы в лактулозу. В настоящей работе исследовали нанофильтрационное концентрирование лактулозосодержащей сыворотки, полученной мембранной электрофлотацией, с целью выяснения роли осмотических явлений в этом процессе. Зависимость скорости нанофильтрации сыворотки после электрофлотационной и термической обработки от концентрации сухих веществ имеет «плато», начинающееся при концентрации 8-10%. Это связано с тем, что лактоза и минеральные соли в слоях сыворотки, прилегающих к мембране, связывают значительное количество воды в гидратных оболочках. Благодаря возникающему на мембране градиенту концентрации свободной воды происходит ее диффузия через мембрану. Измерения активности воды в лактулозосодержащей флотированной сыворотке в зависимости от концентрации сухих веществ подтверждают это предположение. На основании этих измерений сделана оценка увеличения концентрации сыворотки в пограничном слое по сравнению с объемом, оказавшегося равным 3. Влиянию гидратации сухих веществ сыворотки на скорость фильтрации можно дать теоретическое обоснование в рамках количественной физической модели, связывающей скорость фильтрации с активностью воды. Установлено, что использование лактулозосодержащей пищевой добавки на основе творожной сыворотки в производстве хлебобулочных изделий способствует получению готового продукта с пребиотическими свойствами. Кроме этого, применение модифицированной творожной сыворотки позволит обогатить полученное изделие минеральными веществами.

**Ключевые слова:** гидратация пищевых компонентов, лактулозосодержащая сыворотка, мембранная электрофлотация, активность воды, хлебобулочные изделия с сывороткой

## Введение

Активность воды в пищевых системах непосредственно связана с их гидратацией, которая оказывает огромное влияние на возможность их переработки теми или иными способами, поэтому измерения активности воды имеют хорошую перспективу для использования в пищевой промышленности. Однако повсеместное внедрение контроля активности воды сдерживается недостатком информации о применении ее измерений для решения тех или иных технологических задач.

Одним из путей дегидратации пищевых систем является баромембранное концентрирование влагонесодержащего сырья, в частности, молочной сыворотки. При мембранном концентрировании происходит взаимодействие воды с материалом мембраны, что может оказать существенное влияние на характеристики переноса пермеата через мембрану (Лазарев, Головин, Хорохорина, & Хохлов, 2020). Однако при этом важную роль играют и гидратация сухих веществ, например, сахаров, в концентрируемом растворе (Aguirre Montesdeoca, Bakker, Boom, Janssen, & Van der Padt, 2019). Если при обратноосмотическом концентрировании осмотические явления, вызванные гидратацией сухих веществ раствора, играют определяющую роль, то при ультрафильтрации и, тем более, при микрофильтрации их вклад в процессы массопереноса через мембрану, как правило, незначителен. Влияние гидратации сухих пищевых материалов на нанофильтрационное концентрирование их растворов остается малоизученным.

Работы по этой тематике крайне малочисленны. Так, авторами статей (Fuoco, Galier, Roux-de Balman, & De Luca, 2018; Tansel, 2012) методами квантовой механики показано, что увеличение гидратации ионов неорганических солей, диссоциировавших в растворе, приводит к снижению числа ионов, прошедших через нанофильтрационную мембрану, так как с ростом числа гидратации увеличивается размер частиц. Если диэлектрические проницаемости мембраны и раствора существенно различаются, то начинает действовать другой фактор, затрудняющий прохождение ионов через мембрану – их электростатическое взаимодействие с зарядами на поверхности мембраны (Oatley et al., 2012; Fadaei, Hoshyargar, Shirazian, & Ashrafizadeh, 2012) transport of mono and divalent ions through nanofiltration membranes using Donnan-steric pore model and dielectric exclusion (DSPM-DE). Влияние гидратации остальных компонентов сыворотки на ее нанофильтрацию, насколько известно авторам, не изучалось.

В настоящее время известно множество способов применения молочной сыворотки в производстве хлебобулочных изделий. За счет богатого химического состава сыворотки, а именно, минеральных веществ, витаминов, ферментов, органических кислот повышается пищевая, биологическая и энергетическая ценность готовых изделий (Баулина, Щербакова, & Зубцова, 2015; Лукин, Чаплинский, & Душкова, 2015; Азильханов & Смольникова, 2013). Если же провести изомеризацию лактозы в сыворотке, то она способна обогатить хлебобулочные изделия классическим пребиотиком – лактулозой (Цыганова & Стальнова, 2009; Леонидов, 2012; Храмцов, 2011). Одним из способов создания условия для изомеризации – значений водородного показателя 11-11.5 – является электрохимическая активация (Рябцева, 2003; Храмцов, 2007). В настоящей работе для этого используется другая разновидность электрохимической обработки сыворотки – мембранная электрофлотация (Титов, Довгун, & Жданов, 2014). При этом нанофильтрация сыворотки с изомеризованной лактозой существенно снизит расходы по ее доставке на предприятия хлебобулочной промышленности, а также позволит провести ее частичное обессоливание (Володин, Топалов, Евдокимов, Чаблин, & Журко, 2010).

Целью работы является исследование влияния гидратации сухих веществ лактулозосодержащей сыворотки на процесс ее нанофильтрационного концентрирования, изучение возможности определения параметра активности воды в концентратах сыворотки для прогнозирования характера протекания нанофильтрации, а также исследование целесообразности применения полученной лактулозосодержащей сыворотки в производстве хлебобулочных изделий.

## Материалы и методы исследования

Основным объектом исследования была пастеризованная творожная сыворотка, изготовленная на предприятии АО «Молоко», Россось.

Активность воды в молочной сыворотке находили с помощью установки, принцип действия которой основан на равенстве относительной влажности воздуха в замкнутом объеме и активности воды в образце, находящегося в этом объеме. Для измерения относительной влажности воздуха служил психрометрический датчик.

Он представляет собой систему из двух пористых полимерных пластин и находящейся между ними

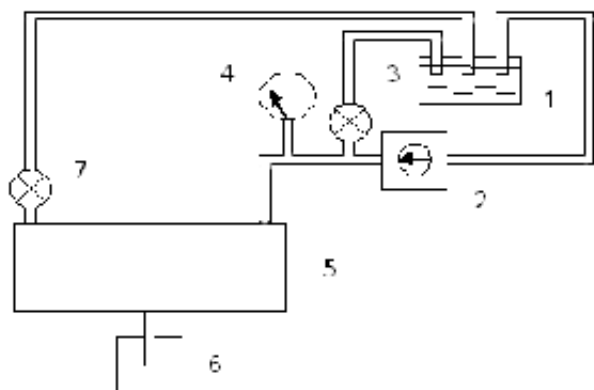


Рисунок 1. Схема нанофильтрационной установки

термопары. Под колпаком, в который встроен этот датчик, находится емкость с исследуемым раствором. Если относительная влажность воздуха под колпаком меньше 100%, то температура полимерных пластинок снижается из-за испарения воды с их поверхности. Можно показать, что ЭДС термопары прямо пропорциональна активности воды в исследуемом образце.

Кроме того, авторами создана и испытана установка для нанофильтрационного концентрирования растворов пищевых материалов, которая представляет собой нанофильтрационную ячейку 5, через которую насосом 2 прокачивается концентрируемый раствор, находящийся в емкости 1 (Рисунок 1). Пермеат стекает в емкость для сбора фильтрата 6. Вентиль 3 служит для регулирования давления концентрируемой жидкости в диапазоне 0 – 2,6 МПа, измеряемого манометром 4, а вентиль 7 – для выбора значений тангенциальной скорости ретентата в пределах 0-2 м/с. Создать доста-

точное для нанофильтрации давление позволяет насос DSY60A.

Микроанализ высушенной сыворотки проводили с использованием электронного микроскопа растрового JEOL-2SM-6380LV.

## Результаты и обсуждения

Экспериментальные исследования проводили в трехкратной повторности, полученные данные обрабатывали общепринятыми методами математической статистики с использованием стандартного пакета прикладных программ MAPLE 8. Ошибка опыта не превышала 5%.

Исследовали нанофильтрацию лактулозосодержащей сыворотки, полученной электрофлотацией творожной сыворотки с последующей тепловой изомеризацией лактозы.

Электрофлотационная обработка сыворотки приводит к росту ее водородного показателя со временем. При электролизе ионов щелочных металлов, содержащихся в сыворотке происходит разложение воды с образованием гидроксил-ионов и газообразного водорода, что и объясняет повышение pH. Гидроксил-ионы являются катализаторами изомеризации содержащейся в сыворотке лактозы в лактулозу.

Времени обработки 40-50 мин вполне достаточно для того, чтобы водородный показатель сыворотки установился на уровне 11,0 – 11,5 (Рисунок 2). Такое значение pH делает возможной последующую тепловую изомеризацию сыворотки.

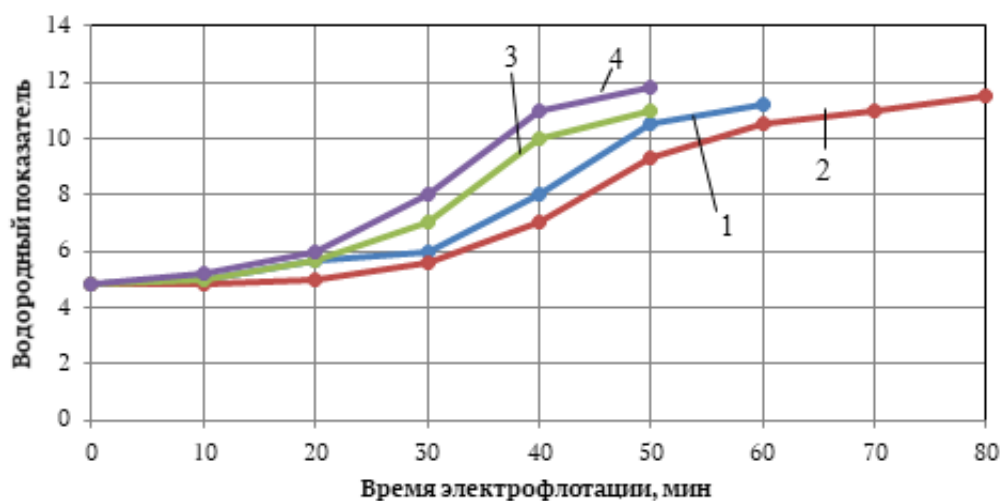


Рисунок 2. Изменение водородного показателя сыворотки в зависимости от времени электрофлотационной обработки при плотностях тока: 1- 1830 А/м<sup>2</sup>, 2 – 1520 А/м<sup>2</sup>, 3 – 2100 А/м<sup>2</sup>, 4 – 2400 А/м<sup>2</sup>

Водородный показатель сыворотки вначале электрофлотационной обработки растет медленно, а затем его рост ускоряется. Это, очевидно, обусловлено нейтрализацией молочной кислоты в сыворотке во время электрофлотации, что повышает буферность сыворотки.

Среднее содержание протеинов в сыворотке после электрофлотационной обработки – 38-40% от исходного количества белка, поэтому большая часть его остается во флотированной сыворотке.

Как показывает микроанализ флотированной сыворотки, значительная часть кальция и фосфора, содержащихся в сыворотке, выносится с пеной, так что по истечении времени флотации в сыворотке остается не более 50% этих элементов.

В исследованиях (Rice et al., 2006) показано, что при мембранной обработке обезжиренного молока на мембране в основном осаждаются фосфат кальция, являющийся одним из компонентов слоя отложений, обуславливающих низкую проницаемость мембраны. Из-за такого осаждения после 1 ч нанофильтрационного концентрирования сыворотки поток фильтрата снижается на 40%. Следовательно, уменьшая концентрацию кальция и фосфора в сыворотке, можно увеличить проницаемость мембраны.

Оптимальная концентрация NaCl в электролите – 45 г/л. При этом обеспечивается не только максимальное удаление белка из сыворотки, но и ее максимальная прозрачность после выдерживания.

Из Рисунка 3 следует, что хотя рост степени изомеризации  $S$  лактозы в сыворотке несколько за-

медляется со временем, величина  $S$  постоянно увеличивается, в отличие от изомеризации растворов лактозы в присутствии щелочей (Храмцов, 2007). Это, возможно, связано с нейтрализацией кислых продуктов реакции, образующихся при распаде лактозы, буферными веществами, присутствующими в сыворотке, а также со снижением темпов распада лактулозы при ее взаимодействии с веществами, образующимся в результате электрофлотационной обработки сыворотки.

Степень изомеризации флотированной сыворотки составляет около 25%. Если температура изомеризации превышает величину 70-72°C, то в сыворотке начинает резко возрастать количество окрашенных соединений.

При нанофильтрации сыворотки, прошедшей электрофлотационную обработку, наблюдается скачкообразное снижение скорости фильтрации при повышении концентрации сухих веществ сыворотки с 8 до 10% (Рисунок 4).

Такое снижение можно объяснить следующим образом. Как известно, в поляризационном слое, образующемся вблизи поверхности мембраны, повышено содержание сухих веществ по сравнению с объемом ретентата. Так как при нанофильтрационном концентрировании сыворотки селективность мембраны по лактозе выбирается высокой, а лактоза является основным компонентом сухих веществ сыворотки, то именно концентрация лактозы и будет определять осмотические свойства раствора вблизи поверхности мембраны. Как только давление в нанофильтрационной установке оказывается ниже осмотического давления растворов лактозы в поляризационном слое, по-

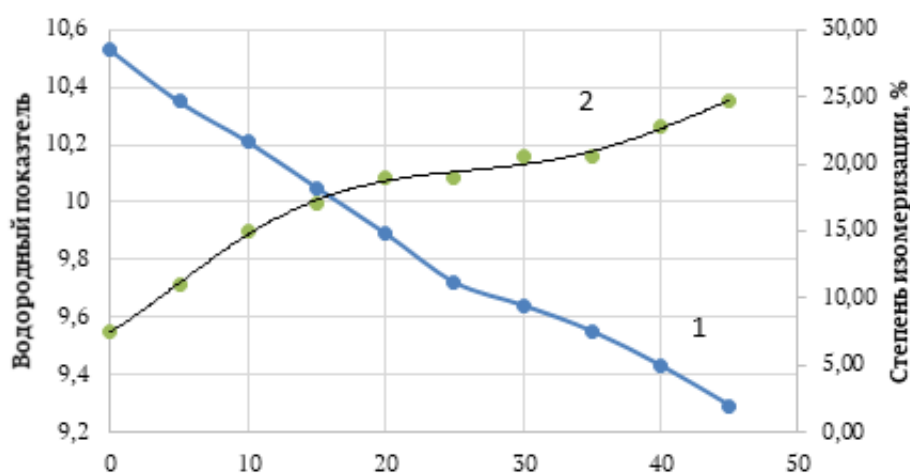


Рисунок 3. Водородный показатель (1) и степень изомеризации лактулозосодержащей сыворотки (2) в зависимости от времени термической обработки

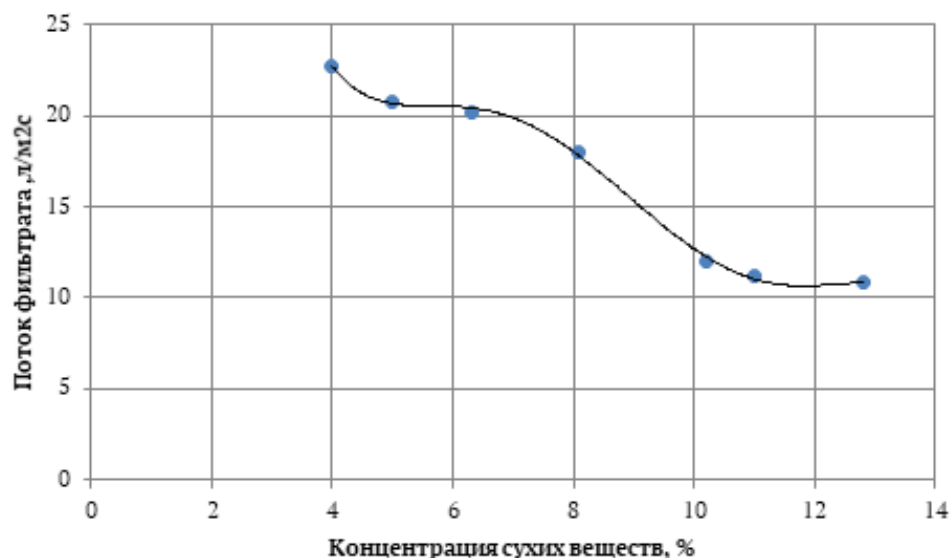


Рисунок 4. Зависимость скорости фильтрации от концентрации сухих веществ

ток через мембрану снижается, что и обуславливает характерный вид зависимости на Рисунке 4.

В исследовании Aguirre Montesdeoca et al., (2019) показано, что гидратация, наряду с молекулярной массой определяет различие в осмотическом давлении концентрированных растворов различных веществ при одной и той же концентрации.

Повышенная концентрация лактозы в поляризованном слое вблизи поверхности мембраны означает, что значительная часть воды в этом слое находится в связанном состоянии в гидратных оболочках лактозы. Таким образом, между границей мембраны с ретентатом и границей с пермеатом возникает градиент концентрации свободной воды, благодаря которому идет ее диффузия через мембрану, т.е. существует поток воды, направленный противоположно потоку, обусловленному градиентом давления.

Поскольку связывание воды в концентрированной сыворотке играет большую роль в процессах массопереноса через мембрану, были предприняты исследования зависимости активности воды – параметра, отражающего степень ее связывания – от содержания сухих веществ в лактулозосодержащей сыворотке, прошедшей обработку методом мембранной электрофлотации (Рисунок 5).

При небольшом содержании сухих веществ в сыворотке осмотическими явлениями можно пренебречь, т.к. активность воды в лактулозосодержащей сыворотке стремится к единице. Однако в случае, когда концентрация сухих веществ оказывается близкой к 18%, величина  $A_w$  начинает снижаться, что указывает на повышение вклада осмотических эффектов в массоперенос.



Рисунок 5. Зависимость активности воды в лактулозосодержащей флотированной сыворотке от концентрации сухих веществ



Графики зависимости активности воды и скорости фильтрации от содержания сухих веществ в сыворотке дают возможность оценить степень концентрирования сыворотке в слое, прилегающем к мембране. С этой целью можно сопоставить концентрацию сухих веществ, при которой начинается быстрый спад скорости фильтрации с концентрацией, соответствующей началу падения активности воды. Найденное таким образом отношение равно 3. Эта величина близка к значениям, указываемым в литературных источниках (Seker, 2017, с. 237-246).

Основной вклад в повышение осмотического давления дают лактоза и лактулоза, гидратация которых является существенной благодаря гидроксильным группам. Модельные представления о концентрировании сахаров с использованием баромембранных процессов изложены в работах (Montesdeoca, Janssenb 2019, с. 161-176), (Montesdeoca, Bakker, 2019, с. 322–332), (Bandini, 2017, с. 57-74).

На основании решения уравнения Максвелла – Стефана рассмотрены три основных механизма транспорта растворенных веществ через поры мембраны – конвективный, диффузионный и механизм, заключающийся в диффузии растворенных веществ под влиянием градиента давления (Aguirre Montesdeoca et.al., 2019). В результате получено выражение для потока растворителя через поры мембраны:

$$j_v = \left( \frac{p_n}{\Delta z} \right) \frac{\pi}{8} \int_0^{\infty} \frac{f_R(r) r^4 \Delta P_e(r)}{\eta(r)} dr, \quad (1)$$

где  $p_n$  – число пор на квадратный метр поверхности мембраны,  $\Delta z$  – толщина активного слоя мембраны,  $f_R(r)$  – функция распределения числа пор по их радиусу, способ определения которой дан в [2],  $r$  – радиус пор,  $\eta(r)$  – вязкость жидкости, протекающей в поре радиусом  $r$ ,  $\Delta P_e(r)$  – эффективный перепад давления на поре радиусом  $r$ .

В отличие от ряда других работ, моделирующих баромембранные процессы (Dey, Linnanen, & Pal, 2012; Mattaraj, Jarusutthirak, Charoensuk, & Jiratananon, 2011), в статье Aguirre Montesdeoca et.al. (2019), учитывается различие перепада давления на порах различных размеров. Так как в поры большего радиуса попадает больше растворенных веществ, то различной будет и вязкость жидкости в разных порах.

Величина эффективного давления  $\Delta P_e$  является функцией осмотического давления  $\Delta \Pi$ , которое

противодействует влиянию давления  $\Delta P$ , создаваемого насосом баромембранной установки:

$$\Delta P_e = \Delta P - \Delta \Pi. \quad (2)$$

Более точное описание  $\Delta P_e$  включает в себя так называемый Stavtman – коэффициент отражения  $\delta_v$  [19]:

$$\Delta P_e = \Delta P - \delta_v \Delta \Pi. \quad (3)$$

Осмотическое давление  $\Delta \Pi$  связано с активностью воды формулой:

$$\Delta \Pi = - \frac{RT}{v_w} \ln A_w, \quad (4)$$

где  $v_w$  – удельный молярный объем воды.

В свою очередь активность воды в растворе смеси олигосахаридов определяется удельной молярной долей воды в растворе  $x_w$ , гидратным числом каждого сегмента олигосахарида  $h_f$  и параметром  $x_{seg}$ :

$$A_w = \frac{x_w - h_f x_{seg}}{1 - h_f} \quad (5)$$

Величина  $x_{seg}$  определяется формулой:

$$x_{seg} = \sum_{i=1}^{m-1} x_i s_i \quad (6)$$

где  $s_i$  – число сегментов (мономеров) в цепи  $i$ -го олигосахарида,  $x_i$  – молярная доля этого олигосахарида в растворе.

Таким образом, наблюдаемое нами влияние гидратации лактозы на поток фильтрата получило в вышеуказанных работах теоретическое обоснование с использованием количественных физических моделей.

Оценки, сделанные по приведенным формулам, показывают, что осмотические эффекты становятся заметными уже на ультрафильтрационных мембранах с отсечением 1000 Да при сгущении растворов дисахаридов с концентрацией 5–20%. Эти расчеты вполне согласуются с экспериментальными данными, полученными в исследовании Aguirre Montesdeoca et al. (2019).

Кроме лактозы и лактулозы, определенный вклад в осмотические эффекты дает гидратация солей, содержащихся в сыворотке. На это указывает различие зависимости потока фильтрата от параметров нанофильтрации до и после электрофлотации.

Полученную лактулозосодержащую сыворотку применяли в производстве хлебобулочных изделий. Известно, что сыворотка является хорошим источником разнообразных ферментов, витаминов, органических кислот, незаменимых аминокислот и других ценных питательных веществ. Использование лактулозосодержащей сыворот-

ки в рецептуре пшеничного хлеба лишь незначительно снижает удельный объем и пористость (Таблица 1). На наш взгляд для достаточного широкого круга потребителей повышение пищевой ценности хлеба с пребиотической добавкой будут гораздо важнее малозаметного снижения удельного объема и пористости изделия.

Таблица 1

*Влияние различных видов сыворотки на качество полуфабриката и хлеба*

Показатели	Значения показателей качества полуфабриката и хлеба, при- готовленного с различными видами сыворотки		
	без внесения (контроль)	сухая подсырная	лактолозосодержащая
Полуфабрикат			
Титруемая кислотность, град, в процессе брожения, мин			
0	2,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1
30	2,6 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,6 ± 0,1
60	3,0 ± 0,1	4,4 ± 0,1	5,4 ± 0,1
90	3,4 ± 0,1	4,6 ± 0,1	6,0 ± 0,1
Газоудерживающая способность, см³, в процессе брожения, мин			
0	20 ± 1,0	20 ± 1,0	20 ± 1,0
30	26 ± 1,3	38 ± 1,9	40 ± 2,0
60	49 ± 2,5	56 ± 2,8	58 ± 2,9
90	58 ± 2,9	60 ± 3,0	66 ± 3,3
Расплываемость шарика, мм, в процессе брожения, мин			
0	60 ± 1,2	62 ± 1,2	63 ± 1,3
30	70 ± 1,4	76 ± 1,5	83 ± 1,7
60	83 ± 1,6	94 ± 1,9	101 ± 2,0
90	100 ± 2,0	105 ± 2,1	123 ± 2,5
Готовое изделие			
Органолептические			
Внешний вид: форма	Соответствует хлебной форме, в которой производилась выпечка		
поверхность	Гладкая, без пустот и уплотнений		
цвет	Светло-желтый	Желтый	Светло-коричневый
Состояние мякиша:			
пропеченность	Пропеченный, не влажный на ощупь		
промесс	Без следов непромесса и комков		
пористость	Развитая, без пустот и уплотнений		
Вкус	Без постороннего привкуса		
Запах	Без постороннего запаха		
Физико-химические			
Влажность мякиша,%	44 ± 0,5	44 ± 0,5	44 ± 0,5
Кислотность мякиша, град	3,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	5,3 ± 0,1
Пористость,%	75 ± 1,0	75 ± 1,0	74 ± 1,0
Удельный объем, см³/100 г	313 ± 6,0	311 ± 6,0	293 ± 6,0

Кроме того, выявлено, что при внесении лактулозосодержащей сыворотки процесс газообразования интенсифицируется, тесто созревает на 30 мин раньше, чем без нее. Готовое изделие с внесением лактулозосодержащей сыворотки обладает привлекательным светло-коричневым цветом корки, наблюдается повышенная кислотность мякиша, что снизит риск развития картофельной болезни.

## Выводы

Таким образом, наличие дисахаридов и неорганических солей в творожной сыворотке, прошедшей электрофлотационную обработку и тепловую изомеризацию, обуславливает понижение активности воды из-за гидратации этих веществ. Снижение активности воды в граничащем с мембраной слое ретентанта вызывает осмотические явления, уменьшающие эффективное давление на мембране, что приводит к снижению потока пермеата с повышением концентрации сухих веществ в сыворотке.

Осмотические эффекты заметно влияют на производительность мембранной установки в случае концентрирования сыворотки в 2,5-3 раза.

Измерение активности воды в концентрированных растворах ретентанта может быть использовано для прогнозирования особенностей нанофильтрационного концентрирования каких-либо пищевых материалов.

В результате исследования доказана целесообразность использования лактулозосодержащей сыворотки в производстве хлебобулочных изделий. Удельный объем и пористость хлеба с добавлением модифицированной сыворотки не выходят за рамки диапазона допустимых величин.

Полученная с помощью электрофлотации с последующей термической обработкой модифицированная творожная сыворотка, обладает рядом преимуществ. Так, внесение лактулозосодержащей сыворотки способствует приданию пребиотических свойств полученным изделиям. Следовательно, разработанный обогатитель является перспективным в производстве хлеба из пшеничной муки.

## Литература

Азильханов, А. С., & Смольникова, Ф. Х. (2013). Применение молочной сыворотки в хлебопечении. В *Инновационные технологии в пищевой*

промышленности: наука, образование и производство: Сборник международной научно-технической конференции (с. 69-72). Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий.

Баулина, Т. В., Щербакова, И. Г., & Зубцова, Ю. И. (2015). Применение в хлебопекарном производстве вторичных молочных продуктов. *Евразийский Союз Ученых*, 4, 23-26.

Володин, Д. Н., Топалов, В. К., Евдокимов, И. А., Чаблин, Б. В., & Журко, Ф. Г. (2010). Применение баромембранных процессов в технологии сухих продуктов. *Переработка молока*, 8, 30-32.

Лазарев, С. И., Головин, Ю. М., Хорохорина, И. В., & Хохлов, П. А. (2020). Исследование структурной организации поверхностного слоя и состояния воды в ультрафильтрационных композиционных мембранах. *Физикохимия Поверхности и Защита Материалов*, 56(2), 132-137. <https://doi.org/10.31857/s0044185620020151>

Леонидов, Д. С. (2012). Пребиотик лактулоза: эффективная стратегия развития здорового питания. *Пищевые ингредиенты, сырье и добавки*, 2, 36-39.

Лукин, А. А., Чаплинский, В. В., & Душкова, М. А. (2015). Биотехнологические аспекты использования молочной сыворотки в технологии хлебобулочных изделий. *АПК России*, 72(2), 103-110.

Рябцева, С. А. (2003). Технология лактулозы. М.: ДеЛипринт.

Титов, С. А., Довгун, Н. П., & Жданов, В. Н. (2014). Свойства творожной сыворотки после электрофлотационной обработки. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*, 1(1), 79-83.

Храмцов, А. Г. (2007). Лактоза и ее производные. СПб.: Профессия.

Храмцов, А. Г. (2011). Обогащение хлебобулочных и кондитерских изделий лактулозой из молочного сырья. *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України*, 3, 35-36.

Цыганова, Т. Б. & Стальнова, И. А. (2009). Хлеб с лактулозой. *Кондитерское и хлебопекарное производство*, 11, 26-28.

Aguirre Montesdeoca, V., Bakker, J., Boom, R. M., Janssen, A. E. M., & Van der Padt, A. (2019). Ultrafiltration of non-spherical molecules. *Journal of Membrane Science*, 570-571, 322-332. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.053>

Bandini, S., & Morelli, V. (2017). Effect of temperature, pH and composition on nanofiltration of mono/disaccharides: Experiments and modeling assessment. *Journal of Membrane Science*, 533, 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.03.021>

Dey, P., Linnanen, L., & Pal, P. (2012). Separation of lactic acid from fermentation broth by cross flow



- nanofiltration: Membrane characterization and transport modelling. *Desalination*, 288, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.009>
- Fadaei, F., Hoshyargar, V., Shirazian, S., & Ashrafizadeh, S. N. (2012). Mass transfer simulation of ion separation by nanofiltration considering electrical and dielectrical effects. *Desalination*, 284, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.018>
- Fuoco, A., Galier, S., Roux-de Balman, H., & De Luca, G. (2018). Correlation between Computed Ion Hydration Properties and Experimental Values of Sugar Transfer through Nanofiltration and Ion Exchange Membranes in Presence of Electrolyte. *Computation*, 6(3), 42. <https://doi.org/10.3390/computation6030042>
- Mattaraj, S., Jarusutthirak, C., Charoensuk, C., & Jiratananon, R. (2011). A combined pore blockage, osmotic pressure, and cake filtration model for crossflow nanofiltration of natural organic matter and inorganic salts. *Desalination*, 274(1-3), 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.010>
- Oatley, D. L., Llenas, L., Pérez, R., Williams, P. M., Martínez-Lladó, X., & Rovira, M. (2012). Review of the dielectric properties of nanofiltration membranes and verification of the single oriented layer approximation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 173, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.02.001>
- Rice, G., Kentish, S., O'Connor, A., Stevens, G., Lawrence, N., & Barber, A. (2006). Fouling behaviour during the nanofiltration of dairy ultrafiltration permeate. *Desalination*, 199(1-3), 239-241. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.058>
- Seker, M., Buyuksari, E., Topcu, S., Babaoglu, D. S., Celebi, D., Keskinler, B., & Aydinler, C. (2017). Effect of pretreatment and membrane orientation on fluxes for concentration of whey with high foulants by using NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> in forward osmosis. *Bioresource Technology*, 243, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.101>
- Tansel, B. (2012). Significance of thermodynamic and physical characteristics on permeation of ions during membrane separation: Hydrated radius, hydration free energy and viscous effects. *Separation and Purification Technology*, 86, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.033>

# Monitoring of Water Activity in Lactulose-Containing Serum Technology

**Elena I. Ponomareva**

Voronezh State University of Engineering Technologies  
19, Revolution Ave., Voronezh, 394036, Russian Federation  
E-mail: elena6815@yandex.ru

**Sergey A. Titov**

Voronezh State University of Engineering Technologies  
19, Revolution Ave., Voronezh, 394036, Russian Federation  
E-mail: 125titov@mail.ru

**Vladimir N. Zhdanov**

Voronezh State University of Engineering Technologies  
19, Revolution Ave., Voronezh, 394036, Russian Federation  
E-mail: sev1a@yandex.ru

**Julia P. Gubareva**

Voronezh State University of Engineering Technologies  
19, Revolution Ave., Voronezh, 394036, Russian Federation  
E-mail: yuliya.gubareva.95@mail.ru

**Darina A. Tereshchenko**

LLC "Domodedovo Catering"  
2, territory of the Domodedovo airport, Domodedovo, 142015, Russian Federation  
E-mail: dasga2005@yandex.ru

One of the main ways of enriching whey with prebiotic substances is to modify its composition by membrane electroflotation followed by isomerization. As a result of these processes, a partial transition of serum lactose to lactulose occurs. In this work, we studied the nanofiltration concentration of the lactulose-containing serum obtained by this method in order to clarify the role of osmotic phenomena in this process. The dependence of the filtration rate of lactulose-containing floated serum on the solids content undergoes a jump at a solids content of 8-10%. This is due to the fact that the boundary layers with a high concentration of lactose contain mainly water bound in hydration shells. Due to the concentration gradient of free water arising on the membrane, it diffuses through the membrane.. Measurement of water activity in lactulose-containing floated whey depending on the concentration of dry matter confirm this assumption. Based on these measurements, an estimate was made of the increase in the concentration of serum in the boundary layer compared to the volume, which turned out to be equal to 3. The effect of whey solids hydration on the filtration rate can be given a theoretical justification in the framework of a quantitative physical model linking filtration rate with water activity. It is established that the use of lactulose-containing food additives based on curd whey in the production of bakery products contributes to the production of a finished product with prebiotic properties. In addition, the use of modified curd whey will enrich the resulting product with minerals.

**Keywords:** lactulose-containing serum, membrane electroflotation, bakery products

## References

- Azil'khanov, A. S., & Smol'nikova, F. Kh. (2013). *Primenenie molochnoi syvorotki v khlebopechenii* [The use of whey in bakery]. In *Innovatsionnye tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti: nauka, obrazovanie i proizvodstvo: Sbornik mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Innovative technologies in the food industry: science, education and production: Collection of the international scientific and technical conference] (pp. 69-72). Voronezh: Voronezhskii gosudarstvennyi universitet inzhenernykh tekhnologii.
- Baulina, T. V., Shcherbakova, I. G., & Zubtsova, Yu. I. (2015). *Primenenie v khlebopekarnom proizvodstve vtorichnykh molochnykh produktov*

- [Application in bakery production of secondary dairy products]. *Evrasiiskii Soyuz Uchenykh [Eurasian Union of Scientists]*, 4, 23-26.
- Khramtsov, A. G. (2007). *Laktoza i ee proizvodnye [Lactose and its derivatives]*. S-Petersburg: Professiya.
- Khramtsov, A. G. (2011). Obogashchenie khlebobulochnykh i konditerskikh izdelii laktulozoi iz molochnogo syr'ya [Enrichment of bakery and confectionery products with lactulose from dairy raw materials]. *Khlibopekars'ka i konditers'ka promislivost' Ukraïni [Bakery and confectionery industry of Ukraine]*, 3, 35-36.
- Lazarev, S. I., Golovin, Yu. M., Khorokhorina, I. V., & Khokhlov, P. A. (2020). Issledovanie strukturnoi organizatsii poverkhnostnogo sloya i sostoyaniya vody v ul'trafil'tratsionnykh kompozitsionnykh membranakh [Investigation of the structural organization of the surface layer and the state of water in ultrafiltration composite membranes]. *Fizikokhimiya Poverkhnosti i Zashchita Materialov [Physicochemistry of Surfaces and Protection of Materials]*, 56(2), 132-137. <https://doi.org/10.31857/s0044185620020151>
- Leonidov, D. S. (2012). Prebiotik laktuloza: effektivnaya strategiya razvitiya zdorovogo pitaniya [Prebiotic lactulose: an effective strategy for the development of a healthy diet]. *Pishchevye ingredienty, syr'e i dobavki [Food ingredients, raw materials and additives]*, 2, 36-39.
- Lukin, A. A., Chaplinskii, V. V., & Dushkova, M. A. (2015). Biotehnologicheskie aspekty ispol'zovaniya molochnoi syvorotki v tekhnologii khlebobulochnykh izdelii [Biotechnological aspects of the use of whey in the technology of bakery products]. *APK Rossii [Agro-industrial complex of Russia]*, 72(2), 103-110.
- Ryabtseva, S. A. (2003). *Tekhnologiya laktulozy [Lactulose technology]*. Moscow: DeLiprint.
- Titov, S. A., Dovgun, N. P., & Zhdanov, V. N. (2014). Svoistva tvorozhnoi syvorotki posle elektroflotatsionnoi obrabotki [Properties of curd whey after electroflotation treatment]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya [Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products]*, 1(1), 79-83.
- Tsyganova, T. B. & Stal'nova, I. A. (2009). Khleb s laktulozoi [Lactulose bread]. *Konditerskoe i khlebopekarnoe proizvodstvo [Confectionery and bakery production]*, 11, 26-28.
- Volodin, D. N., Topalov, V. K., Evdokimov, I. A., Chablin, B. V., & Zhurko, F. G. (2010). Primenenie baromembrannykh protsessov v tekhnologii sukhikh produktov [Application of baromembrane processes in dry product technology]. *Pererabotka moloka [Milk processing]*, 8, 30-32.
- Aguirre Montesdeoca, V., Bakker, J., Boom, R. M., Janssen, A. E. M., & Van der Padt, A. (2019). Ultrafiltration of non-spherical molecules. *Journal of Membrane Science*, 570-571, 322-332. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.053>
- Bandini, S., & Morelli, V. (2017). Effect of temperature, pH and composition on nanofiltration of mono/disaccharides: Experiments and modeling assessment. *Journal of Membrane Science*, 533, 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.03.021>
- Dey, P., Linnanen, L., & Pal, P. (2012). Separation of lactic acid from fermentation broth by cross flow nanofiltration: Membrane characterization and transport modelling. *Desalination*, 288, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.009>
- Fadaei, F., Hoshyargar, V., Shirazian, S., & Ashrafizadeh, S. N. (2012). Mass transfer simulation of ion separation by nanofiltration considering electrical and dielectrical effects. *Desalination*, 284, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.018>
- Fuoco, A., Galier, S., Roux-de Balman, H., & De Luca, G. (2018). Correlation between Computed Ion Hydration Properties and Experimental Values of Sugar Transfer through Nanofiltration and Ion Exchange Membranes in Presence of Electrolyte. *Computation*, 6(3), 42. <https://doi.org/10.3390/computation6030042>
- Mattaraj, S., Jarusutthirak, C., Charoensuk, C., & Jiratananon, R. (2011). A combined pore blockage, osmotic pressure, and cake filtration model for crossflow nanofiltration of natural organic matter and inorganic salts. *Desalination*, 274(1-3), 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.010>
- Oatley, D. L., Llenas, L., Pérez, R., Williams, P. M., Martínez-Lladó, X., & Rovira, M. (2012). Review of the dielectric properties of nanofiltration membranes and verification of the single oriented layer approximation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 173, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.02.001>
- Rice, G., Kentish, S., O'Connor, A., Stevens, G., Lawrence, N., & Barber, A. (2006). Fouling behaviour during the nanofiltration of dairy ultrafiltration permeate. *Desalination*, 199(1-3), 239-241. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.058>
- Seker, M., Buyuksari, E., Topcu, S., Babaoglu, D. S., Celebi, D., Keskinler, B., & Aydinler, C. (2017). Effect of pretreatment and membrane orientation on fluxes for concentration of whey with high foulants by using NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> in forward osmosis. *Bioresource Technology*, 243, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.101>
- Tansel, B. (2012). Significance of thermodynamic and physical characteristics on permeation of ions during membrane separation: Hydrated radius, hydration free energy and viscous effects. *Separation and Purification Technology*, 86, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.033>