

## Использование измерений внутреннего трения для исследования ультра- и нанофильтрации модифицированной творожной сыворотки

Людмила В. Антипова <sup>1</sup>	antipova.l54@yandex.ru
Сергей А. Титов <sup>1</sup>	125titov@mail.ru
Всеволод Н. Жданов <sup>1</sup>	sev1a@yandex.ru
Александра Н. Карпак <sup>1</sup>	t.kuran@yandex.ru

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Аннотация.** Предложена методика экспериментального определения внутреннего трения в пищевых материалах, а также устройство на основе крутильного маятника с лазерной регистрацией угла поворота, обеспечивающее минимальное относительное смещение слоев исследуемого материала в процессе измерений. Определение внутреннего трения основано на нахождении затухания крутильного маятника, соединенного с цилиндром, погружаемым в исследуемую среду. В качестве примера применения метода к пищевым системам, определена зависимость внутреннего трения от вязкости в растворах сахарозы и глицерина. Эта зависимость линейна для растворов сахарозы и нелинейна для растворов глицерина, что может быть связано с особенностями взаимодействия гидратированных молекул в растворах. Приведены примеры применения измерений внутреннего трения при исследовании процессов мембранного концентрирования. Метод внутреннего трения использовался как вспомогательный реологический метод в комплексном исследовании процесса осаждения концентрируемых веществ на мембранах при ультра- и нанофильтрации молочной сыворотки. Так, показано, что, несмотря на малую по сравнению с мембраной толщину, поляризационный слой вносит значительный вклад во внутреннее трение системы «мембрана-слой». Это приводит к резкому снижению потока фильтрата творожной сыворотки через мембрану, по сравнению с потоком воды при тех же условиях. Определена зависимость внутреннего трения от концентрации в творожной сыворотке, прошедшей электрофлотационную обработку, а также тепловую изомеризацию содержащейся в ней лактозы. С помощью подобных кривых могут быть найдены связи между коэффициентом проницаемости  $L_p^*$  в уравнении Кедем–Качальского и параметрами процесса нанофильтрации заданных пищевых систем.

**Ключевые слова:** внутреннее трение, ультрафильтрация, нанофильтрация, молочная сыворотка

## The use of internal friction measurements for the study of ultra- and nanofiltration of modified curd whey

Ludmila V. Antipova <sup>1</sup>	antipova.l54@yandex.ru
Sergey A. Titov <sup>1</sup>	125titov@mail.ru
Vsevolod N. Zhdanov <sup>1</sup>	sev1a@yandex.ru
Alexandra N. Karpak <sup>1</sup>	t.kuran@yandex.ru

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Abstract.** A technique is proposed for the experimental determination of internal friction in food materials, as well as a device based on a torsion pendulum with laser registration of the angle of rotation, which ensures the minimum relative displacement of the layers of the material under study in the measurement process. The definition of internal friction is based on finding the attenuation of a torsion pendulum connected to a cylinder immersed in the medium under study. As an example of the application of the method to food systems, the dependence of internal friction on viscosity in solutions of sucrose and glycerin is determined. This dependence is linear for sucrose solutions and non-linear for glycerol solutions, which may be due to the interaction of hydrated molecules in solutions. Examples of the application of internal friction measurements in the study of membrane concentration processes are given. The method of internal friction was used as an auxiliary rheological method in a comprehensive study of the process of deposition of concentrated substances on membranes during ultra- and nanofiltration of whey. Thus, it has been shown that, despite the thinness in comparison with the membrane, the polarization layer makes a significant contribution to the internal friction of the membrane-layer system. This leads to a sharp decrease in the flow of curd whey filtrate through the membrane, compared with the flow of water under the same conditions. The dependence of internal friction on the concentration in the curd whey that underwent electroflotation treatment was determined, as well as the thermal isomerization of the lactose contained in it. Using such curves, the relationships between the permeability coefficient  $L_p^*$  in the Kedem–Kachelsky equation and the parameters of the nanofiltration process of given food systems can be found.

**Keywords:** internal friction, ultrafiltration, nanofiltration, whey

Для цитирования

Антипова Л.В., Титов С.А., Жданов В.Н., Карпак А.Н. Использование измерений внутреннего трения для исследования ультра- и нанофильтрации модифицированной творожной сыворотки // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 298–303. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-298-303

For citation

Antipova L.V., Titov S.A., Zhdanov V.N., Karpak A.N. The use of internal friction measurements for the study of ultra- and nanofiltration of modified curd whey. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 298–303. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-298-303

### Введение

Известно, что для окисления 1 л сыворотки необходимо 50 г. кислорода, что более чем в 10 раз превышает этот показатель для бытовых сточных вод [1]. Ультрафильтрация сыворотки не решает проблему образования лактозосодержащих отходов, сброс которых в канализацию приводит к серьезному ущербу для экологического состояния окружающей среды. Применение нанофильтрации способствует решению экологических задач, так как нанофильтрационные мембраны задерживают лактозу [2]. Изомеризация лактозы в лактулозу в сыворотке позволяет получить продукт с пробиотическими свойствами [3]. Нанофильтрация сыворотки после изомеризации в ней лактозы позволяет сконцентрировать ее для резкого сокращения затрат на транспортировку и хранение при реализации предприятиям-потребителям и, кроме того, позволяет расширить ассортимент выпускаемой с ее добавлением продукции за счет снижения содержания воды и солей. Кроме того, нанофильтрация позволяет получить лактулозосодержащую сыворотку с заданными характеристиками качества – содержанием сухих веществ и степенью обессоливания.

Для исследования процессов фильтрации часто применяют реологические методы. Из реологических параметров пищевого сырья и продуктов наиболее употребительной является величина вязкости. Однако кроме вязкости существует и другая величина, характеризующая диссипативные процессы в материалах, – внутреннее трение. Традиционно его измеряют в твердых телах, например, в металлах или полупроводниках и используют для выявления дефектов в структурах кристаллических твердых тел и для изучения природы этих дефектов [4–6]. Однако в последнее время появляется все больше публикаций, таких как [7], в которых описываются исследования полимеров этим методом. Возникает вопрос, можно ли использовать этот метод для исследования структурно-механических свойств систем, образованных пищевыми биополимерами или пищевыми материалами с более простой молекулярной структурой?

Часто пищевое сырье и продукты представляют собой жидкообразные системы. Для ньютоновских жидкостей величины вязкости и внутреннего трения совпадают. Однако большинство пищевых материалов проявляют свойства структурированной жидкости, вязкопластического или вязкоупругого тела, поэтому их характеризуют понятием эффективной вязкости. Ее величина зависит от условий измерения, таких, как скорость течения исследуемого материала в вискозиметре, величина зазора между ротором вискозиметра и стенками емкости

с исследуемым веществом и т. д. Поэтому с помощью одного лишь параметра эффективной вязкости трудно охарактеризовать исследуемый материал, проанализировать зависимости вязкости от параметров технологического процесса, сравнить свои данные с данными других авторов. В процессе измерения эффективной вязкости в вискозиметре разрушается структура материала, в то же время для анализов физических процессов в пищевых материалах в ходе того или иного метода обработки нужны данные о неразрушенной структуре. Эти данные можно получить методом внутреннего трения.

Предложена методика измерения внутреннего трения в пищевых материалах, приведены примеры использования измерений внутреннего трения при исследованиях пищевых систем, описано применение измерений внутреннего трения для исследования баромембранных процессов.

### Результаты и обсуждение

Внутреннее трение в материалах, как правило, изучают, создавая в исследуемом теле некий колебательный процесс. Колебания, искусственно созданные в теле, с течением времени затухают, упругая энергия колебания рассеивается в тепловую энергию. Различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую объединены общим названием – внутреннее трение. Характеристикой внутреннего трения является величина:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W},$$

где  $\Delta W$  – энергия, рассеянная за один период колебаний по всему объему образца;  $W$  – энергия колебания всего образца, отвечающая амплитудным значениям напряжения и деформации.

Можно показать, что величина внутреннего трения  $\Psi$  связана с логарифмическим коэффициентом затухания  $\beta$  формулой.

$$\Psi = 2 \cdot \beta,$$

где  $\beta = \ln E_n / E_{n+1}$ ;  $E_n$  – максимальное смещение материала от положения равновесия в ходе колебаний с номером  $n$ , а  $E_{n+1}$  – то же для следующего  $n+1$ -го колебания.

Таким образом, внутреннее трение в материале можно однозначно характеризовать с помощью величины  $\beta$  – логарифмического декремента затухания колебаний, созданных в этом материале.

Разработана установка для определения внутреннего трения продуктов питания и пищевого сырья (рисунок 1).

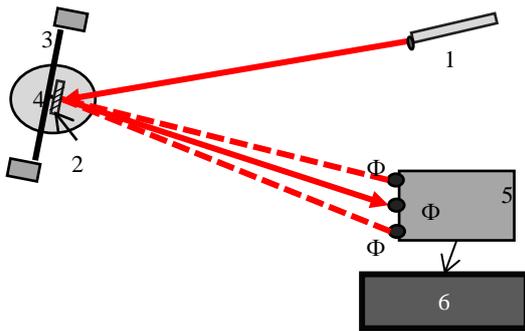


Рисунок 1. Схематическое изображение установки для определения внутреннего трения (вид сверху): 1 – лазер; 2 – зеркало; 3 – крутильный маятник; 4 – измерительный цилиндр; Φ1, Φ2, Φ3 – фотоприемники; 5 – блок сопряжения; 6 – персональный компьютер

Figure 1. Schematic diagram of the installation for determining the internal friction (top view): 1 – laser; 2 – mirror; 3 – torsional pendulum; 4 – measuring cylinder; Φ1, Φ2, Φ3 – photodetectors; 5 – interface unit; 6 – PC

Основой установки является крутильный маятник, с которым состыкован цилиндр, погружаемый в исследуемую среду. На маятнике укреплено зеркало. Световой луч, испускаемый полупроводниковым лазером, отражается от зеркала и попадает на систему фотоприемников, сигналы от которых через блок сопряжения передаются на персональный компьютер. Внутреннее трение в исследуемой среде является основной причиной затухания колебаний маятника. При колебаниях зеркала световой луч, отраженный от него, последовательно проходит через фотоприемники. В моменты прохождения луча через них блок сопряжения вырабатывает импульсы, поступающие на компьютер через параллельный порт. Программа ввода и обработки данных вычисляет декремент затухания колебательной системы. Для такого расчета программа вначале измеряет время  $t_n$  пребывания луча за пределами системы фотоприемников справа от них при колебании с номером  $n$ , т. е. с момента, когда луч прошел третий датчик Φ3 до момента возвращения к этому датчику (рисунок 2). Затем строит график зависимости  $t_n$  от  $n$ . Можно показать, что эта

зависимость – экспоненциальная с показателем экспоненты, линейно зависящим от декремента затухания колебаний маятника. На заключительном этапе определяется декремент затухания. Применение лазера позволяет работать с очень малыми углами отклонения маятника, соответственно относительное смещение слоев исследуемого материала в процессе измерений минимально и исследуемый материал практически не разрушается. Прибор предусматривает возможность исследования внутреннего трения в пленках с нанесенных на них слоем. Для этого полоска пленки прикрепляется к измерительному цилиндру и основанию прибора.

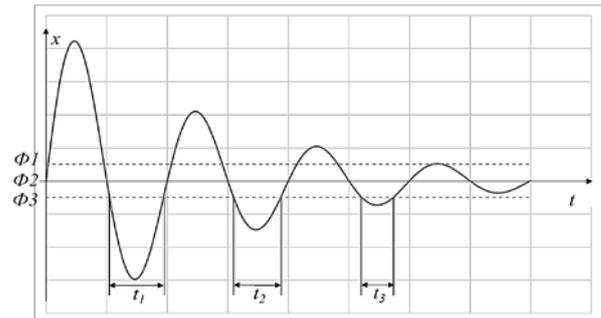


Рисунок 2. Зависимость координаты проекции луча на поверхность панели фотоприемников от времени

Figure 2. The dependence of the coordinates of the projection of the beam on the panel surface of the photodetectors from time to time

Пищевая среда в описываемом приборе для измерения внутреннего трения совпадает с геометрией ротационного вискозиметра (в обоих случаях используется цилиндр, поворачивающийся или вращающийся в исследуемой среде), следует ожидать соответствия внутреннего трения и вязкости, определенной роторным вискозиметром. На рисунке 3, а представлена зависимость внутреннего трения в растворах сахарозы от их вязкости. Вязкость растворов изменяли варьируя концентрацию. Видно, что зависимость внутреннего трения  $\Psi$  от вязкости  $\eta$  в широком диапазоне концентрации сахарозы близка к линейной.

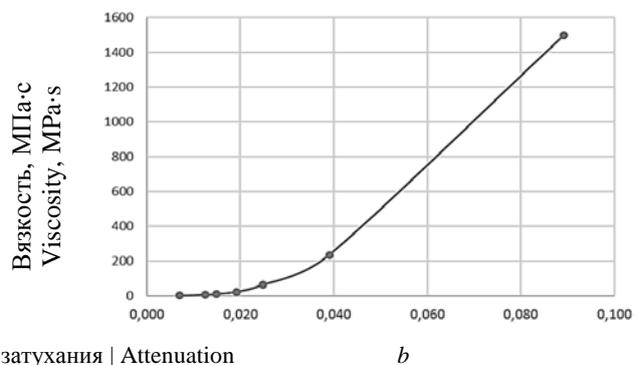
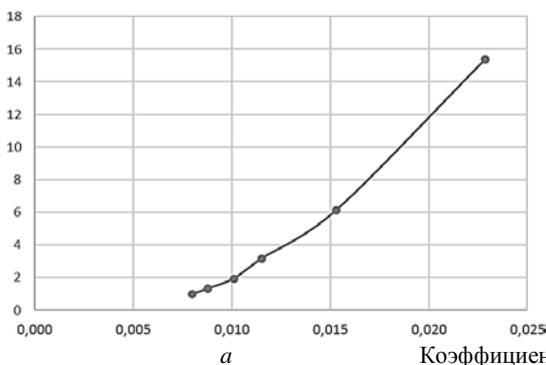


Рисунок 3. Зависимость вязкости от коэффициента затухания колебаний маятника при исследовании водных растворов: а – сахарозы (концентрация 0–60%); б – глицерина (концентрация 0–95%)

Figure 3. Dependence of viscosity on the damping coefficient of pendulum oscillations in the study of aqueous solutions: а – sucrose (concentration 0–60%); б – glycerin (concentration 0–95%)

Однако характеристика  $\Psi(\eta)$  для водных растворов глицерина с различными концентрациями является нелинейной (рисунок 3, *b*). Можно предположить, что слабо гидратированные молекулы глицерина при высоких концентрациях раствора сильно взаимодействуют между собой, так как этому практически не препятствует гидратная оболочка. Поэтому для разрыва этих контактов при вязком течении жидкости необходима значительная энергия, что и приводит к очень большим величинам вязкости при малых концентрациях. В то же время при очень малых относительных смещениях слабо гидратированных молекул глицерина, происходящих при изменении внутреннего трения, не все молекулы разрывают взаимные связи, что и приводит к более плавному росту внутреннего трения с увеличением концентрации глицерина в области высоких концентраций. При высоких концентрациях вязкость глицерина оказывается значительной при невысоком затухании, что и обуславливает подъем графика.

Таким образом, метод внутреннего трения совместно с измерениями вязкости может быть применен при оценке характера межмолекулярных взаимодействий в гидратированных системах.

При мембранном разделении пищевых сред вблизи поверхности мембраны имеется слой с повышенной концентрацией ретентата. Он также может быть отнесен к гидратированным системам, поэтому имеется возможность исследовать процессы мембранного концентрирования методом внутреннего трения.

Процессы мембранного разделения часто анализируют с использованием расширенного уравнения Нернста–Планка или уравнения Кедем–Качальского [8]. В последнем уравнении в качестве параметра входит величина  $L_p^*$ , которая имеет физический смысл, совпадающий со смыслом величины  $K/\eta$  в уравнении Дарси:

$$Q = \frac{KF \Delta p}{\eta \Delta x},$$

где  $Q$  – общий расход фильтруемой жидкости;  $F$  – площадь сечения;  $\eta$  – вязкость жидкости.

Коэффициент фильтрации  $K$  в этом уравнении зависит от размера частиц, их формы, степени шероховатости, пористости среды. Если через мембрану фильтруется вода, то коэффициент  $K$  характеризует в основном проницаемость самой мембраны для воды. Однако если происходит микро-, ультра- или нанофильтрация раствора, коллоидной системы или суспензии, то на поверхности мембраны образуется

поляризационный слой [9]. В этом случае фильтрация идет через систему двух проницаемых сред, одной из которых является мембрана, а другой – поляризационный слой [10].

Часто скорость фильтрации водного раствора ниже скорости фильтрации воды в несколько раз, из чего можно сделать вывод, что коэффициент фильтрации  $K$  зависит в основном от свойств поляризационного слоя, в первую очередь, от его структуры.

Чем больший вклад вносит поляризационный слой в величину внутреннего трения системы «мембрана – поляризационный слой», тем с большей вероятностью коэффициент фильтрации определяется не свойствами мембраны, а свойствами поляризационного слоя.

В качестве примера можно привести структурно-механические свойства мембран с поляризационными слоями, осаждающимися на них в процессе ультрафильтрации творожной сыворотки.

Результаты измерения внутреннего трения в мембранах показывают, что средние значения декремента затухания исходных мембран составляли  $3,97 \text{ с}^{-1}$ . Та же характеристика этих мембран после ультрафильтрации в течение 30 мин имела величину  $4,52 \text{ с}^{-1}$  при частоте колебаний 10 Гц. Воспроизводимость результатов измерения декрементов затухания оказалась равной 0,5%. По данным просвечивающей электронной микроскопии мембран после ультрафильтрации сыворотки толщина поляризационных слоев составляет 0,75 мкм, что согласуется с данными других авторов. В то же время толщина трековой мембраны равна 10 мкм. Таким образом, несмотря на малую по сравнению с мембраной толщину, белковый слой вносит значительный вклад во внутреннее трение системы «мембрана–слой». Анализ данных электронной микроскопии в сопоставлении с литературными данными показывает, что поляризационные слои сформированы пластинами  $\beta$ -лактоглобулина с включениями глобул  $\alpha$ -лактоальбумина. Повышенное значение внутреннего трения в белковых слоях, видимо, обусловлено большой прочностью контактов между глобулами  $\alpha$ -лактоальбумина с окружающими их пластинами  $\beta$ -лактоглобулина. Производительность ультрафильтрации по сыворотке в 5–7 раз меньше производительности по воде.

Процессы структурообразования в поляризационном слое можно смоделировать, концентрируя и исследуя структурно-механические свойства раствора, подлежащего фильтрации. Однако при этом нельзя пользоваться ротационными или капиллярными вискозиметрами,

так как при их применении разрушается структура исследуемой системы. В данном случае незаменимым будет использование неразрушающих методов контроля структурно-механических свойств, таких как измерение внутреннего трения. Кроме того, при ультра- или нанофильтрации практически отсутствует течение поляризационного слоя в направлении, нормальном к поверхности мембран, поэтому в этом случае больше подходит параметр внутреннего трения, чем вязкости.

В процессах нанофильтрационного сгущения растворов сахаров на поверхности мембраны может образовываться не гелеобразный слой, а некоторый вязкий слой, концентрация которого значительно выше концентрации рабочего раствора. Здесь важную роль играет осмотическая составляющая потока растворителя, выраженная слагаемым  $L_p^* \Delta\pi/\Delta x$  в уравнении Кедем–Качальского (здесь  $\pi$  – осмотическое давление раствора). Как видно, в это слагаемое входит коэффициент  $L_p^*$ , определяющийся проницаемостью поляризационного слоя, зависящей от внутреннего трения в нем. Поэтому и для нанофильтрации могут быть применены те же подходы, что и для ультра- и микрофильтрации при моделировании поляризационных слоев и исследовании структурно-механических свойств модельных объектов.

На рисунке 4 представлена зависимость внутреннего трения в творожной сыворотке, прошедшей электрофлотационную обработку, а также тепловую изомеризацию лактозы.

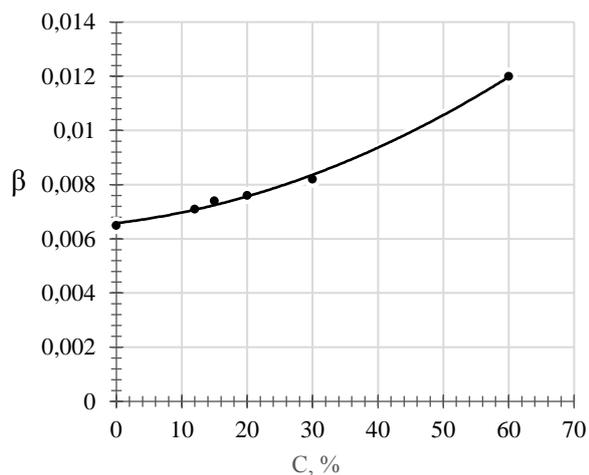


Рисунок 4. Зависимость коэффициента внутреннего трения в концентрированной после нанофильтрации сыворотке от концентрации сухих веществ

Figure 4. Dependence of the coefficient of internal friction in the serum concentrated after nanofiltration on the concentration of dry substances

Сопоставляя данные по внутреннему трению в сыворотке и растворах сахарозы, можно заметить, что кривая зависимости внутреннего трения от концентрации для сахарозы в области высоких концентраций растет значительно быстрее, чем для сыворотки. Это позволяет понять причину относительно высокой производительности нанофильтрации лактулозосодержащей флотированной сыворотки – явления, обуславливающего диссипативные эффекты фильтрации. Например, задержка потока фильтра из-за внутреннего трения между водой и гидратированными частицами в концентрированных растворах смеси лактозы с лактулозой с примесью минеральных солей выражена слабее, чем в растворах других сахаров. Кроме того, можно сделать и чисто практический вывод – концентрировать нанофильтрацией напитки на основе флотированной сыворотки, подслащенной сахарозой, нецелесообразно из-за малой производительности процесса. Эмпирически найденные коэффициенты внутреннего трения, а также величины активности воды в сыворотке в зависимости от концентрации позволили на основе уравнений Кедем–Качальского провести расчет зависимости потока пермеата от давления и скорости тангенциального потока. Расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными.

Поэтому изучение внутреннего трения мембран с поляризационным слоем или модельных концентрированных растворов или гелей дает возможность оценить степень уменьшения скорости фильтрации из-за отложения высокомолекулярных веществ на мембране. Это в перспективе позволяет строить зависимости коэффициента проницаемости  $L_p^*$  в уравнении Кедем–Качальского от параметров процесса фильтрации заданных пищевых систем.

В отличие от вискозиметра приборы для измерения внутреннего трения способны измерять характеристики как жидкости, так и твердых тел, что делает их удобными для изучения фазовых переходов воды пищевых продуктов. Примерами могут быть кристаллизация влаги в процессе замораживания пищевых продуктов и ее испарение в процессах их сушки.

### Заключение

Метод внутреннего трения, в случае совместного применения с другими физическими методами, может дать ценную информацию о физических процессах в ходе ультра- или нанофильтрации творожной сыворотки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Храмов А.Г. Феномен молочной сыворотки. СПб: Профессия, 2011. 804 с.
- 2 Синельников Б.М., Храмов А.Г., Евдокимов И.А., Рябцева С.А. и др. Лактоза и ее производные. СПб: Профессия, 2007. 768 с.
- 3 Леонов В.Ю. Лактулоза: диапазон использования в пищевой промышленности // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2011. № 10. С. 34–35.
- 4 Скворцов А.И., Плюснин Е.С., Скворцов А.А. Особенности амплитудной зависимости внутреннего трения и структура отожженного циркония // Вестник Тамбовского университета. 2016. Т. 21. № 3. С. 830–832.
- 5 Биланич В.С. Бучук Р.Ю., Петриченко А.Е., Скубенич Н.К. и др. Внутреннее трение в суперионных кристаллах  $Cu_6 PS_5 Br$  и композитах на их основе // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 4. С. 711–716.
- 6 Блантер М.С. Что такое внутреннее трение // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 80–85.
- 7 Колупаев Б.Б., Левчук В.В., Максимцев Ю.Р., Колупаев Б.С. Вязкоупругие модули и внутреннее трение металлонаполненного поливинилхлорида // Акустический вестник. 2013–2014. Т. 16. № 1. С. 27–32.
- 8 Auclair B., Nikonenko V., Larchet C., Metayer M. et al. Correlation between transport parameters of ion-exchange membranes // Journal of Membrane Science. 2002. V. 195. P. 89–102.
- 9 Hua X. Coupled model of extended Nernst–Planck equation and film theory in nanofiltration for xylooligosaccharide syrup // Journal of Food Engineering. 2010. V. 100. № 2. P. 302–309.
- 10 Deon S. Dutournie P., Limousy L., Bourseau P. The two-dimensional pore and polarization transport model to describe mixtures separation by nanofiltration: Model validation // AIChE Journal. 2010. № 57(4). P. 985–995.
- 11 Nooshkam M., Madadlou A. Microwave-assisted isomerisation of lactose to lactulose and Maillard conjugation of lactulose and lactose with whey proteins and peptides // Food Chemistry. 2016. V. 200. P. 1–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Людмила В. Антипова** д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, antipova.l54@yandex.ru  
**Сергей А. Титов** д.т.н., профессор, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, 125titov@mail.ru  
**Всеволод Н. Жданов** аспирант, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sev1a@yandex.ru  
**Александра Н. Карпак** магистрант, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, t.kuran@yandex.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 27.11.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 13.12.2018

REFERENCES

- 1 Hramcov A.G. Fenomen molochnoj syvorotki [Whey phenomenon]. Saint Petersburg, Ppofecciya, 2011. 804 p. (in Russian).
- 2 Sinel'nikov B.M., Hramcov A.G., Evdokimov I.A., Ryabceva S.A. et al. Laktoza i ee proizvodnye [Lactose and its derivatives]. Saint Petersburg, Ppofecciya, 2007. 768 p. (in Russian).
- 3 Leonov V.Yu. Lactulose: range of use in the food industry. *Konditerskoe i hlebopekarnoe proizvodstvo* [Confectionery and bakery production]. 2011. no. 10. pp. 34–35. (in Russian).
- 4 Skvorcov A.I., Plyusnin E.S., Skvorcov A.A. Features of the amplitude dependence of internal friction and the structure of annealed zirconium. *Vestnik Tambovskogo universiteta* [Bulletin of Tambov University]. 2016. vol. 21. no. 3. pp. 830–832. (in Russian).
- 5 Bilanich V.S. Buchuk R.Yu., Petrichenkov A.E., Skubenich N.K. et al. Internal Friction in  $Cu_6 PS_5 Br$  Superionic Crystals and Composites Based on Them. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid]. 2014. vol. 56. no. 4. pp. 711–716. (in Russian).
- 6 Blanter M.S. What is internal friction. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal* [Soros Educational Journal]. 2004. vol. 8. no. 1. pp. 80–85. (in Russian).
- 7 Kolupaev B.B., Levchuk V.V., Maksimcev Yu.R., Kolupaev B.S. Viscoelastic modules and internal friction of metal-filled polyvinyl chloride. *Akusticheskij vestnik* [Acoustic Bulletin]. 2013–2014. vol. 16. no 1. pp. 27–32. (in Russian).
- 8 Auclair B., Nikonenko V., Larchet C., Metayer M. et al. Correlation between transport parameters of ion-exchange membranes. *Journal of Membrane Science*. 2002. vol. 195. pp. 89–102.
- 9 Hua X. Coupled model of extended Nernst–Planck equation and film theory in nanofiltration for xylooligosaccharide syrup. *Journal of Food Engineering*. 2010. vol. 100. no. 2. pp. 302–309.
- 10 Deon S. Dutournie P., Limousy L., Bourseau P. The two-dimensional pore and polarization transport model to describe mixtures separation by nanofiltration: Model validation. *AIChE Journal*. 2010. no. 57 (4). pp. 985–995.
- 11 Nooshkam M., Madadlou A. Microwave-assisted isomerisation of lactose to lactulose and Maillard conjugation of lactulose and lactose with whey proteins and peptides. *Food Chemistry*. 2016. vol. 200. pp. 1–9.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Ludmila V. Antipova** Dr. Sci. (Engin.), professor, department of technology of animal products, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antipova.l54@yandex.ru  
**Sergey A. Titov** Dr. Sci. (Engin.), professor, department of physics, heating engineering and heat power engineering, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, 125titov@mail.ru  
**Vsevolod N. Zhdanov** graduate student, department of physics, heating engineering and heat power engineering, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sev1a@yandex.ru  
**Alexandra N. Karpak** master student, department of technology of fermenting and sugary industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, t.kuran@yandex.ru

CONTRIBUTION

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 11.27.2018

ACCEPTED 12.13.2018