

Поведение коэффициентов диффузии при посоле сельди в неподвижном тузлуке в области отрицательных температур

Мария В. Шуманова,¹ maria.shumanova@klgtu.ru
Юрий А. Фатыхов,¹ elina@klgtu.ru
Вячеслав А. Шуманов² vshumanov@inbox.ru

¹ кафедра пищевых и холодильных машин, Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, г. Калининград, 236022, Россия

² кафедра физики, Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, г. Калининград, 236022, Россия

Реферат. В настоящей работе обозначена актуальность тузлучного посола сельди при отрицательных температурах с учетом положительной динамики ее вылова, запасов, благоприятного воздействия холода на подавление жизнедеятельности микроорганизмов, улучшения качества продукции и увеличения времени хранения. Исследовались изменения такой значимой характеристики как коэффициент диффузии в процессе посола при отрицательных температурах. Для исследования был использован метод фотонной корреляционной спектроскопии, основанный на релеевском рассеянии излучения от вещества. Получены экспериментальные зависимости коэффициентов диффузии от глубины проникновения соли в тузлуку, коже и мясе сельди в диапазоне температур от $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые носят волнообразный характер. Также получена зависимость коэффициентов диффузии от отрицательной температуры в диапазоне от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеющая гармонический вид. Возникающий температурный градиент является источником возмущений, приводящий к образованию термоконвективных волн. На основании теоретических исследований академика А.В. Лыкова и химических процессах, происходящих на границе (коже) раздела фаз с использованием основного уравнения термохимии – закона Гиббса, объясняется механизм образования термоконвективных волн, влияющих на коэффициент диффузии. Получена связь коэффициентов диффузии с размерами диффундирующих частиц, несущая гиперболический характер в диапазоне температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в тузлуке, коже и мясе сельди. Высказана возможность ускорения посола путем механического воздействия на исследуемый объект (в частности звуком или ультразвуком). Разрушение диффундирующих частиц, представляющих собой объединения ионов Na^+ и Cl^- молекулами воды, способствует увеличению коэффициента диффузии.

Ключевые слова: сельдь, посол, отрицательные температуры, метод фотонной корреляционной спектроскопии, коэффициент диффузии, термоконвективные волны

The behavior of the diffusion coefficients in salting of herring in a fixed brine at subzero temperatures

Maria V. Shumanova,¹ maria.shumanova@klgtu.ru
Yurii A. Fatykhov,¹ elina@klgtu.ru
Vyacheslav A. Shumanov² vshumanov@inbox.ru

¹ food and refrigeration machines department, Kaliningrad State Technical University, Soviet Av., 1 Kalinngrad, 236022, Russia

² physics department, Kaliningrad State Technical University, Soviet Av., 1 Kalinngrad, 236022, Russia

Summary. The relevance of herring brine salting at subzero temperatures, taking into account the positive dynamics of its catching, its reserves, a favorable cooling effect on the suppression of microorganisms activity, improvement of product quality and increasing of storage time are indicated in this paper. Changes in such a significant characteristics as the diffusion coefficient in the process of salting at subzero temperatures were studied. Method of photon correlation spectroscopy, based on the Rayleigh scattering of radiation from the substance was used for the study. The experimental diffusion coefficient dependences on the depth of penetration of the salt in brine, skin and meat of herring at temperatures ranging from $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ were obtained. They are of wave-like nature. The dependence of the diffusion coefficients on subzero temperature ranging from $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, and having a harmonic form was also obtained in the work. The resulting temperature gradient is a source of perturbations, giving rise to thermoconvective waves. According to the theoretical research of Academician A.V. Lykov and chemical processes occurring at the border (skin) of phase separation using the basic equation of thermochemistry - Gibbs law, mechanism of thermoconvective waves influencing the diffusion coefficient is explained. A relation between the diffusion coefficients with the size of the diffusing particles, having hyperbolic character in the temperature range from $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the in brine, skin and meat of herring was determined. The possibility of acceleration of salting by means of mechanical impact on the object under study (in particular sound or ultrasound) was expressed. The destruction of the diffusing particles, representing the union of Na^+ and Cl^- with water molecules, increases the diffusion coefficient.

Keywords: herring, salting, subzero temperatures, the method of photon correlation spectroscopy, diffusion coefficient, thermal convective wave

Введение

В общем объёме вылова порядка 8% занимает сельдь, запасы которой являются достаточными. Сельдь, как объект обработки, является классическим (традиционным) видом сырья для посола, так как она принадлежит к числу рыб, способных созреть во время посола. Этот способ консервирования не потерял актуальности и в настоящее время, когда с помощью

посола получают либо готовые изделия, обладающие специфическим ароматом и вкусом, либо полуфабрикаты, из которых в дальнейшем изготавливают вяленую, копчёную, сушёную, маринованную продукцию.

Посол – сложный массообменный процесс, состоящий из диффузионного перехода соли в рыбу, диффузионно-осмотического переноса воды из тканей рыбы в тузлук и наоборот.

Для цитирования

Шуманова М.В., Фатыхов Ю.А., Шуманов В.А. Поведение коэффициентов диффузии при посоле сельди в неподвижном тузлуке в области отрицательных температур // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С. 49–55. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-49-55

For citation

Shumanova M.V., Fatykhov Yu.A., Shumanov V.A. The behavior of the diffusion coefficients in salting of herring in a fixed brine at subzero temperatures. Vestnik VSUET [Proceedings of VSUET]. 2016. no.3. pp.49–55. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-49-55

Движущей силой процесса посола является градиент концентрации раствора хлористого натрия как основного применяемого в промышленности консерванта, во внешней солевой среде (тузлуке) и тканях гидробионтов.

До недавних пор производство рыбы крепкого посола (свыше 12% массовой доли соли) занимало доминирующее место. В последние годы учёными установлено отрицательное воздействие на организм человека чрезмерного употребления хлористого натрия. К негативным последствиям относят: заболевания сердечно-сосудистой системы; повышение возбудимости центральной нервной системы, способствующей развитию гипертонической болезни; ингибирующее воздействие натрия на липопротеиновую липазу крови, уменьшающее коллоидную стабильность холестерина и являющееся одной из причин развития атеросклероза и др.

Как показали маркетинговые исследования по изучению удовлетворения потребностей населения качеством солёной рыбопродукции, гастрономические предпочтения потребителя (76%) склоняются в сторону малосолёного продукта (3–6% массовой доли соли).

С целью значительного снижения жизнедеятельности микроорганизмов и активности тканевых ферментов, а также улучшения качественных характеристик солёного продукта ряд исследователей предлагают осуществлять комбинированный посол рыбы, сочетая её обработку на отдельных этапах, как при положительных, так и отрицательных (до минус 22 °С) температурах [1, 2]. Однако эти работы посвящены установлению закономерностей при сухом посоле рыбы и не раскрывают механизм массопереноса при тузлучном (мокроем) посоле.

Учитывая положительную динамику вылова сельди, её промысловый запас, благоприятное воздействие холода на подавление жизнедеятельности микроорганизмов, увеличение продолжительности хранения и улучшения качества продукта, представляется актуальным исследование и установление закономерностей процесса тузлучного посола рыбы при отрицательных температурах.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали сельдь атлантическую (*Clupea harengus*) мороженую, по качеству отвечающую требованиям действующего стандарта размером 30 ± 2 см, массой 310 ± 10 г. Химический состав мяса сельди атлантической: жир 18,5%, белок 18%, минеральные вещества 1,5%.

Для составления тузлука определенной заданной концентрации (плотности) использовали хлористый натрий по ГОСТ 4233 и воду питьевую по ГОСТ Р 51232–98.

Для исследования процесса диффузии соли в тканях сельди существующие химические способы определения солёности рыбы не позволяют получить информацию о пространственно-временном характере распределения соли в продукте. Для установления механизма распространения соли необходимо применять новые методы исследования, основанные на взаимодействиях излучений (акустических или электромагнитных) с веществом. Таким методом может быть современный оптический метод – фотонной корреляционной спектроскопии, основанный на релеевском рассеянии излучения от веществ. Учёными ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» – Брюхановым В.В., Ивановым А.М. и др. в лаборатории микро- и нанотехнологий кафедры физики данный метод успешно применялся для исследования взаимодействия различных веществ, однако его приемлемость и целесообразность для исследования процессов пищевой технологии впервые высказана и обоснована Фатыховым Ю.А., Шумановой М.В., Шумановым В.А. [3].

Метод фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС) заключается в измерении коэффициента диффузии дисперсных частиц путём анализа динамических флуктуаций интенсивности рассеянного света. ФКС позволяет измерить коэффициент диффузии этих частиц и, соответственно, размер дисперсных частиц, который связан с коэффициентом диффузии [4].

Схема экспериментальной установки для исследования процесса посола мяса сельди методом фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС) показана на (рисунок 1).

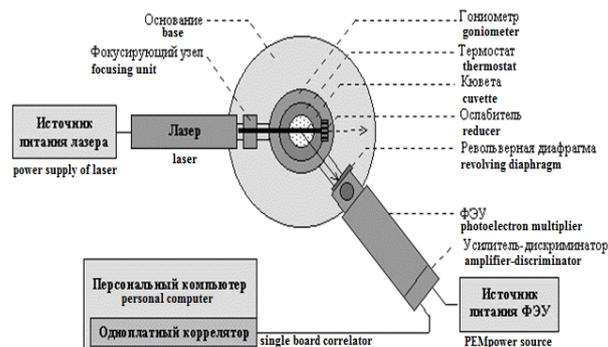


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Figure 1. Diagram of the experimental facility

Она включает в себя: источник излучения, кювету с исследуемым веществом, анализатор и коррелятор, принимающие рассеянное излучение через фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) и выводящие полученную информацию на дисплей компьютера. Источником излучения является одноимодовый He-Ne лазер ($W = 15$ мВт; $\lambda = 632,8$ нм; диаметр луча 100 мкм). Флуктуации интенсивности света, рассеянного на разных дисперсных частицах, регистрировались фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), работающим в режиме счета фотонов.

Корреляционная функция вычислялась с использованием 32-битного 282-канального коррелятора «Photocor-FC», подключённого к компьютеру и снабжённого программой Flex 5.3.3. Программа рассчитывала корреляционную функцию рассеяния (временное разрешение $t = 25$ нс), определяла функцию распределения частиц по размерам и вычисляла коэффициент диффузии из корреляционной функции. Программа рассчитывала коэффициент диффузии с относительной погрешностью не более 5%.

Образцы сельди с кожей помещались в кювету из кварцевого стекла кожей вверх и заливались раствором NaCl заданных концентрации и температуры. Кювета помещалась в термостат, находящийся на платформе гониометра. Перемещение кюветы по высоте осуществлялось через 1 мм с помощью микрометрического устройства. В каждый фиксированный момент производилось сканирование лазерным лучом тузлука, кожи и мяса сельди по высоте кюветы.

Отрицательные температуры создавались путём циркуляции тосола с жидким азотом вокруг кюветы с исследуемым образцом сельди.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 показано поведение коэффициента диффузии при отрицательных температурах на коже, в тузлуке, и мясе сельди. В тузлуке измерения проводились на расстоянии 1 мм от кожи, т. е. в пограничном слое, а в мясе – на расстоянии 6 мм от кожи вглубь мяса сельди.

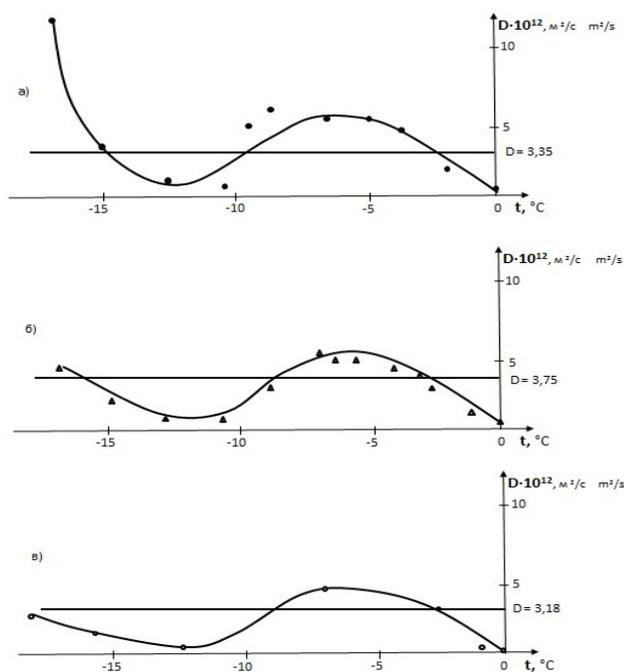


Рисунок 2. Зависимость коэффициента диффузии от температуры а) на коже; б) в тузлуке; в) в мясе

Figure 2. The dependence of the diffusion coefficient on temperature a) on the skin; b) in brine; c) in the meat

Как видно из рисунка 2 в исследуемых срезах образца происходят изменения коэффициентов диффузии от температуры, а изменения температуры, очевидно, связано с микроконвекцией.

На рисунке 3 представлены изменения коэффициентов диффузии по толщине исследуемого образца в кювете.

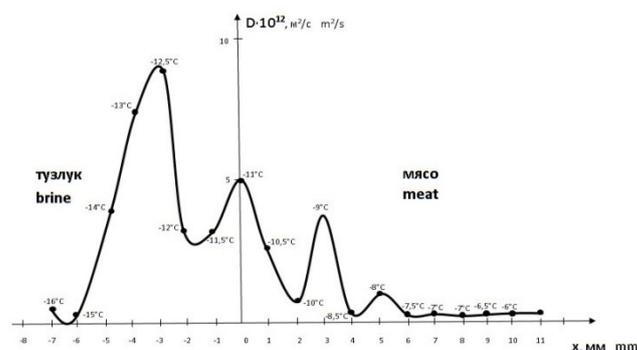


Рисунок 3. Зависимость коэффициента диффузии от расстояния в тузлуке и мясе $x = 0$ – кожа; $x > 0$ – мясо сельди; $x < 0$ – тузлук

Figure 3. The dependence of the diffusion coefficient of solution in brine and meat $x = 0$ – the skin; $x > 0$ – her- rington meat; $x < 0$ – brine

Основной движущей силой диффузионно-осмотического переноса соли и тканевой влаги рыбы является градиент концентрации. Это связано с тем, что при охлаждении образца рыбы с раствором соли до -20°C , межклеточная жидкость, находящаяся в тканях рыбы, и раствор соли не замерзают полностью. На границе раздела фаз возникают градиенты температур, связанные с термодинамическим равновесным состоянием, т.е. кристаллизацией соли и ее растворением. В результате происходит выделение и поглощение теплоты, способствующее микроконвекции.

Так как характер поведения коэффициентов диффузии, изображённый на рисунках 2 и 3 имеет качественные и количественные отличия от аналогичной зависимости при положительных температурах [5], приведём теоретические обоснования данного явления.

По мнению А.В. Лыкова [6], при малых числах Грасгофа ($Gr < 50$), в случае наличия источника возмущений наблюдается конвективное движение жидкости в направлении градиента возмущения за счёт молекулярной теплопроводности. Возникающие термоконвективные волны имеют вид колебательных движений при участии вязких и инерционных сил, приводящих к снижению амплитуды колебаний вплоть до полного затухания волн.

Рассмотрим подробнее механизмы возникновения термоконвективных волн. Для этого принимаем следующие начальные условия осуществления процесса: насыщенный раствор NaCl с массовой концентрацией 26% при 25 °С и мясо сельди замораживаем до -18 °С (рисунок 4).

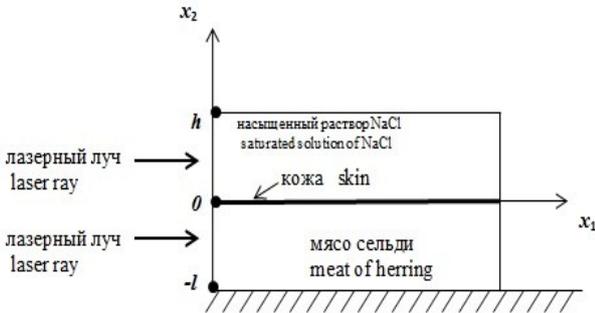


Рисунок 4. Схема расположения раствора и мяса сельди в кювете в исследовании процесса посола при отрицательных температурах

Figure 4. Diagram of location solution and herring meat in a cell in the study salting process at low temperatures

Предполагается, что на боковой стенке ($x_1 = 0$) имеется источник периодических возмущений температуры (как и в [6]) и вертикальной составляющей скорости. Возмущения будут распространяться вдоль слоя в виде термоконвективных волн, характеристики которых определяются толщиной слоя h , свойствами жидкости, условиями на границах и величиной

градиента температур $\gamma = -\frac{\partial T_0}{\partial x_2}$, где T_0 – равно-

весное распределение температур.

Будем исходить из известных уравнений естественной конвекции в приближении Буссинеска (1):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \tau} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{g} + \beta \theta \bar{g}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \bar{g} \nabla \theta &= \alpha \nabla^2 \theta; \\ \operatorname{div} \bar{g} &= 0; \\ \rho - \rho_0 &= -\rho_0 \beta \theta; \\ \theta &= T - T_0. \end{aligned} \right\} (1)$$

где ρ_0 – значение плотности при постоянной температуре T_0 ; $\beta = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{T_0}$ – коэффициент теплового расширения жидкости.

Ограничимся рассмотрением возмущений малой амплитуды, что позволит пренебречь конвективными членами в (1).

Получаем линейную систему уравнений для двумерной задачи:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_1^*}{\partial \tau^*} &= \frac{\partial P^*}{\partial x_1^*} + \nabla^{*2} v_1^* \\ \frac{\partial v_2^*}{\partial \tau^*} &= \frac{\partial P^*}{\partial x_2^*} + \nabla^{*2} v_2^* + \operatorname{Gr} \theta \\ \frac{\partial v_1^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial v_2^*}{\partial x_2^*} &= 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau^*} &= \frac{1}{\operatorname{Pr}} \nabla^{*2} \theta + v_2^* \end{aligned} \right\} (2)$$

где $\nabla^{*2} = \frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}}$ – оператор Лапласа;

$\operatorname{Gr} = \frac{\beta g h^4 \gamma}{\nu^2}$ – число Грасгофа; $\operatorname{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$ – число Прандтля.

Использованы следующие безразмерные величины:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= h x_1^*; \quad x_2 = h x_2^*; \quad v = \frac{\nu}{h} v^*; \quad P = \frac{\rho \nu^2}{h^2} P^*; \\ \tau &= \frac{h^2}{\nu} \tau^*; \quad \theta = \frac{T - T_1}{\gamma h}; \quad \omega = \frac{\gamma}{h^2} \omega^* \end{aligned} \right\} (3)$$

Далее знак «*», обозначающий безразмерные величины, будем опускать.

Таким образом, свойства термоконвективных волн в слое будут определяться безразмерными параметрами: Gr , Pr , ω .

Исключая из системы (2) все неизвестные, получаем уравнение для определения вертикальной компоненты скорости:

$$\nabla^2 \left(\frac{\partial}{\partial \tau} - \nabla^2 \right) \left(\frac{\partial}{\partial \tau} - \frac{1}{\operatorname{Pr}} \nabla^2 \right) v_2 = \operatorname{Gr} \frac{\partial^2 v_2}{\partial x_1^2} \quad (4)$$

Будем искать решение уравнения (4) в виде плоских волн:

$$v_2 = V_2(x_2) e^{i(\omega \tau - k x_1)} \quad (5)$$

с амплитудой, зависящей от x_2 .

Тогда из (4) получаем:

$$\left[\omega - i \left(k^2 - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) \right] \left[-\frac{i}{\operatorname{Pr}} \left(k^2 - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) \right] \left(k^2 - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) V_2 = \operatorname{Gr} k^2 V_2, \quad (6)$$

где k – волновой вектор, обезразмеренный по высоте слоя.

Решение уравнения (6) для слоя свободной верхней и твердой нижней (кожей) границами, на которых поддерживается постоянная температура. Равенство нулю на границах поперечной составляющей скорости V_2 , возмущения температуры θ и касательных напряжения $\frac{\partial v_1}{\partial x_1}$ учёт (2) даёт граничные условия для V_2 :

$$V_2 = \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} = \frac{\partial^4 V_2}{\partial x_2^4} = 0 \text{ при } x_2 = 0, h. \quad (7)$$

Уравнению (6) с граничными условиями (7) удовлетворяет решение:

$$V_2 = \sin \pi x_2. \quad (8)$$

Напомним, что в выражении (8) V_2 и x_2 – безразмерные величины.

Подставляя (8) в (5), имеем:

$$v_2 = \sin \pi x_2 e^{i(\omega \tau - k x_1)}. \quad (9)$$

При избавлении от безразмерного вида:

$$v_2 = \frac{v}{h} \sin \frac{\pi x_2}{h} e^{i \left(\frac{h^2}{v} \omega - \frac{v}{h^2} \tau - \frac{2\pi x_1}{\lambda} \right)}. \quad (10)$$

Воспользуемся данным решением. Примем случай: кювета с исследуемым образцом, охлажденная до температуры -18°C , помещается на столик гониометра с более высокой температурой (комнатной плюсовой). Этим самым исключаем периодическое боковое температурное воздействие, т. е. с боков происходит стационарное воздействие среды с температурой выше, чем у образца.

Для этого примем значение частоты внешнего воздействия равным нулю, пользуясь решением (10), получаем:

$$v_2 = \frac{v}{h} \sin \frac{\pi x}{h} e^{-i \frac{2\pi x_1}{\lambda}} \quad (11)$$

Используя формулу Эйлера и выделяя действительную часть, получаем:

$$v_2 = \frac{v}{h} \sin \frac{\pi x_2}{h} \cos \frac{2\pi x_1}{\lambda}. \quad (12)$$

Таким образом, получаем гармонические изменения вертикальной скорости в толще образца.

Расчётное максимальное значение вертикальной составляющей скорости конвективного движения при боковом температурном воздействии с нулевой частотой ($\omega=0$) равно $v_{2\max} \approx 0,3 \text{ мм/с}$.

Термоконвекции и образованию термоконвективных волн способствуют также химические процессы, происходящие на коже сельди (происходит диссоциация и кристаллизация). В результате этого наблюдается поглощение и выделение теплоты.

Направленность процесса и тепловой эффект определяется основным уравнением термодинамики – законом Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - TS, \quad (13)$$

где ΔG – изменение энергии Гиббса; ΔH – изменение энтальпии; ΔS – изменение энтропии; T – абсолютная температура.

Действительно, в уравнении (13) имеется два члена.

Для грубой оценки того, в каком направлении может протекать тот или иной процесс при низких и высоких температурах, можно воспользоваться приближенным уравнением для изменения энергии Гиббса [7-9]. При низких температурах множитель T мал и абсолютное значение произведения TS тоже мало. В этом случае для реакций, имеющих значительный тепловой эффект, $|\Delta H| \gg TS$. Тогда в выражении (13) вторым членом можно пренебречь. При этом получим:

$$\Delta G \approx \Delta H. \quad (14)$$

При достаточно высоких температурах (множитель T велик) имеет обратное соотношение:

$$|\Delta H| \ll TS. \quad (15)$$

Пренебрегая теперь первым членом в выражении энергии Гиббса, получим:

$$\Delta G \approx -TS. \quad (16)$$

Эти приближенные равенства показывают, что при низких температурах критерием направления самопроизвольного протекания процесса в первом приближении может служить знак теплового эффекта, а при высоких – процесс, сопровождающийся увеличением энтропии.

Процесс выделения теплоты непосредственно вблизи границы раздела фаз способствует возникновению градиента температуры $\gamma = \partial T / \partial x$, который изменяется внутри раствора соли от 1,0 до 0,5 $^\circ\text{C}/\text{мм}$, а в межклеточном пространстве мяса сельди от 0,5 до 0 $^\circ\text{C}/\text{мм}$ (рисунок 3).

Диффузионно-осмотический перенос соли и тканевой влаги рыбы сопровождается малыми температурными возмущениями, вызывающими образование слабозатухающих термоконвективных волн.

В диапазоне изменения температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ была получена экспериментальная зависимость коэффициентов диффузии D в тузлуке, коже и мясе сельди от размеров диффундирующих частиц R (рисунок 5).

$$D \cdot R = 242,5 \cdot 10^{-12}, (\text{m}^2/\text{c}) \cdot \text{нм} \quad (17)$$

Диффундирующими частицами являются ионы Na^+ и Cl^- , связывающие собою большое количество молекул воды H_2O . Так из курса химии известно, что на одну молекулу NaCl приходится 400 молекул воды. Следовательно, зная коэффициент диффузии, по формуле (17) можно оценить размер диффундирующей частицы.

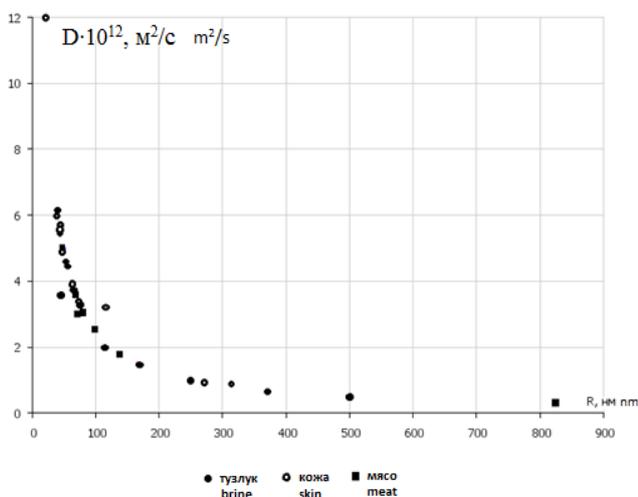


Рисунок 5. Зависимость коэффициента диффузии от размера диффундирующих частиц

Figure 5. The dependence of the diffusion coefficient on the size of the diffusing particles

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов А.М. и др. Исследование массообменных процессов при комбинированном сухом посоле рыбы // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т. 13. № 4/1. С. 673–677.

1 Побоклова Т.И., Глущенко Л.Ф. Совершенствование посола скумбрии при ее подготовке к копчению // Ученые записки Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого. № 3. 2015. С. 1-5

2 Фатыхов Ю.А., Шуманова М.В., Шуманов В.А. Применение нанотехнологических методов для исследования процесса посола сельди // Тр. XI междунауч.-техн. конф. «Инновации в науке, образовании и бизнесе» Калининград. 2013. Ч. 1. С. 261–263.

3 Bryukhanov V.V., Ivanov A.M., Voronin T.A., Khitrin A.V. et al. Laser ablation of metal nanoparticles in liquid and study the structures obtained by methods correlation spectroscopy // Education and Science Without Borders. 2011. V. 2. Issue 4. P. 113-115.

Механически разрушая диффундирующие частицы (например, с помощью акустических воздействий, т. е. звука), становится возможным увеличить значение коэффициента диффузии, тем самым ускорить продолжительность процесса посола рыбы.

Выводы

1. Выявлена актуальность тузлучного посола рыбы при отрицательных температурах.

2. На основе метода фотонной корреляционной спектроскопии получены волнообразные изменения коэффициентов диффузии от глубины проникновения соли в тузлуке, коже и мясе сельди, а также от температуры в диапазоне от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. На основе исследований академика А.В. Лыкова и химических процессов, происходящих на границе раздела фаз у кожи сельди, объясняется механизм образования термоконвективных волн, источником которых является температурный градиент, уменьшающийся по глубине проникновения соли. Вследствие чего термоконвективные волны слабо затухают.

4. Получена зависимость коэффициентов диффузии от размеров диффундирующих частиц R :

$$D \cdot R = 242,5 \cdot 10^{-12}, (\text{m}^2/\text{c}) \cdot \text{нм}$$

5. Для ускорения процесса посола целесообразно механическое разрушающее воздействие на диффундирующие частицы, в результате чего увеличивается коэффициент диффузии.

4 Шуманова М.В., Фатыхов Ю.А., Шуманов В.А. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса посола сельди // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2. С. 30–34.

5 Лыков А.В., Берковский Б.М. Конвекция и тепловые волны. М.: «Энергия», 1974, 336 с.

6 Артамонова И.В. Леснова Л.А. Русакова С.М. Годунов Е.Б. Оценка растворимости солей щелочных металлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 3. № 1(15). С. 5–8.

7 Pelegrina J.L., Gennaria F.C., Condóa A.M., Fernández Guillermeta A. Predictive Gibbs-energy approach to crystalline/amorphous relative stability of nanoparticles: Size-effect calculations and experimental test // Journal of Alloys and Compounds. 2016. V. 689. P.161–168

8 Xianzhen Xu, Yangdong Hu, Lianying Wu, Xia Chen A new model in correlating and calculating the solid-liquid equilibrium of salt-water systems // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2016. V. 24. Issue. 8. P. 1056–1064

REFERENCES

1. Ershov A.M. A study of weight and metabolic processes in the combined dry salting fish *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University] 2010, vol. 13, no. 4/1, pp. 673–677. (in Russian).

1 Pobokova T.I., Gluschenko L.F. Improving salting mackerel process of its treatment for smoking. *Uchenye zapiski Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yaroslava Mudrogo* [Scientific notes of Novgorod State University of Yaroslav Mudry] 2015, no. 3, pp. 1–5. (in Russian).

2 Fatykhov Yu.A., Shumanova M.V., Shumanov V.A. The use of nanotechnology techniques to study the process of salted herring. *Trudy 11 mezhdunarodnoi. nauchno-tekhnicheskoi konferencii* [Proceedings of XI Intl. scientific-technical. conf.] 2013, vol. 1, pp. 261–263. (in Russian).

3 Bryukhanov V.V., Ivanov A.M., Voronin T.A., Khitrin A.V. et al. Laser ablation of metal nanoparticles in liquid and study the structures obtained by methods correlation spectroscopy. *Education and Science Without Borders*, 2011, vol. 2, issue 4, pp. 113–115.

4 Shumanova M.V., Fatykhov Yu.A., Shumanov V.A. The results of experimental and theoretical studies salting process herring. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta ingenernyh technologii* [Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technology] 2015, no. 2, pp. 30–34. (in Russian).

5 Lykov A.V., Berkovskii B.M. *Konvektsiya i teplovie volny* [Convection and heat waves]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 336 p. (in Russian).

6 Artamonova I.V., Lesnova L.A., Rusakova S.M., Godunov E.B. Evaluation of solubility of alkali metal salts. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the MSTU] 2013, no. 1 (15), vol. 3, pp. 5–8. (in Russian).

7 Pelegrina J.L., Gennaria F.C., Condó A.M., Fernández Guillermeta A. Predictive Gibbs-energy approach to crystalline/amorphous relative stability of nanoparticles: Size-effect calculations and experimental test. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 689, pp. 161–168.

8 Xianzhen Xu, Yangdong Hu, Lianying Wu, Xia Chen A new model in correlating and calculating the solid–liquid equilibrium of salt–water systems. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, vol. 24, issue 8, pp. 1056–1064.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мария В. Шуманова аспирант, кафедра пищевых и холодильных машин, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия, maria.shumanova@klgtu.ru

Юрий А. Фатыхов профессор, заведующий кафедрой пищевых и холодильных машин, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия, elina@klgtu.ru

Вячеслав А. Шуманов доцент, кафедра физики, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет, Советский пр-т, 1, Калининград, 236022, Россия, vshumanov@inbox.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Maria V. Shumanova graduate student, food and refrigerating machines department, Kaliningrad State Technical University, Soviet Av., 1 Kalinngard, 236022, Russia, maria.shumanova@klgtu.ru

Yurii A. Fatykhov Professor, the Head of Department, Food and refrigerating machines department, Kaliningrad State Technical University, Soviet Av., 1 Kalinngard, 236022, Russia, elina@klgtu.ru

Vyacheslav A. Shumanov associate Professor, Physics department, Kaliningrad State Technical University, Soviet Av., 1 Kalinngard, 236022, Russia, vshumanov@inbox.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Мария В. Шуманова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Юрий А. Фатыхов консультация в ходе исследования

Вячеслав А. Шуманов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, выполнил расчёты

CONTRIBUTION

Maria V. Shumanova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Yurii A. Fatykhov consultation during the study

Vyacheslav A. Shumanov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ПОСТУПИЛА 01.08.2016

RECEIVED 8.1.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 22.08.2016

ACCEPTED 8.22.2016