

УДК 664.8: 95 + 66-93

Числа подобия в процессах сушки, копчения и обжаривания рыбы

Д-р техн. наук **А.М. Ершов**, ErshovAM@mstu.edu.ruканд. техн. наук **В.А. Похольченко**, v.pokholchenko@yandex.ruканд. техн. наук **М. А. Ершов**, ErshovMA@mstu.edu.ruФГБОУ ВПО «Мурманский государственный технический университет»
183010, Мурманск, ул. Спортивная, 13

В статье рассматривается важная для пищевой промышленности задача, связанная с возможностью аналитического проектирования рациональных режимов тепловой обработки сырья обжариванием, вялением, холодным, полугорячим и горячим копчением, а также оптимизацией работы промышленного теплового оборудования. Рассмотрены теоретические предпосылки возможности обобщения и выявления подобия в процессах обезвоживания и нагрева влажных материалов. Авторами глубоко изучены закономерности протекания процессов тепловой обработки рыбы разного видового и размерно-массового состава в различных технологических режимах. Отсутствие данных закономерностей очень затрудняет выбор оптимальных режимов тепловой обработки сырья, проектирование нового или совершенствование имеющегося теплового оборудования. Указаны факторы, оказывающие влияние на изменение внутренней структуры и свойств материала, замедляющие процесс обезвоживания. Отмечена зависимость темпа обезвоживания рыбных продуктов от химического состава, геометрических размеров нагреваемого тела и режимных параметров исследуемых процессов. Значительное количество опытного материала обобщено авторами с использованием безразмерных чисел подобия (симплексов). Применение чисел подобия позволило выявить ряд несложных математических моделей для описания изучаемых явлений. Разработаны обобщенные кинетические зависимости обезвоживания рыбы, обобщенные динамические зависимости, показывающие изменение коэффициентов диффузии влаги. Обобщенные математические модели в сочетании с найденными эмпирическим путем уравнениями, открывают уникальную возможность расчета кинетики и динамики обезвоживания рыбы с разработкой оптимальных режимов работы промышленных установок.

Ключевые слова: обезвоживание; сушка; копчение; обжаривание; диффузия; критическая влажность; режимные параметры; обобщенная зависимость; число подобия; безразмерный симплекс.

Numbers of similarity at the processes of fish drying, smoking and frying

Ph.D. **Alexander M. Ershov**, ErshovAM@mstu.edu.ruPh.D. **Vyacheslav A. Pokholchenko**, v.pokholchenko@yandex.ruPh.D. **Mikhail A. Ershov**, ErshovMA@mstu.edu.ruMurmansk State Technical University,
183010, Russia, Murmansk, Sportivnaya str., 9

The article describes important for the food industry problem of creating the possibility of analytical engineering of rational regimes of raw material processing by frying, drying, cold-, semi-hot- and hot smoking, and also optimizing the thermal equipment operating. There are described the theoretical presuppositions of the possibility of generalizing and founding the similarity of raw materials dehydration processes. The regularities of heat treatment processes of different species and size-mass dimensions fish at different technological regimes are deeply studied by authors. The absence of these regularities highly complicates the choice of optimal regimes of raw material heat treatment, designing modern units or improving available thermal equipment. The factors that influence the changing of structure and material properties, also inhibiting of dehydration processes are stated there. There presented the dehydration rate dependence of fish chemical composition, geometric dimensions and regime parameters of researching processes. A significant amount of experienced material is generalized on the basis of dimensionless similarity. The using of dimensionless simplex allowed detecting a row of simple mathematical models describing the studied phenomena. The generalized kinetic of fish dehydration and the generalized dynamic

models of moisture diffusion coefficients are founded. The generalized mathematical models, combined with empirically derived equations open the unique possibility of calculating fish kinetics and dynamics of dehydration, designing the rational regimes of industrial equipment operating.

Keyword: dehydration; drying; smoking; frying; moisture diffusion; critical moisture; operating parameters; generalized dependence; similarity number; dimensionless simplex.

Создание приближенных методов расчета кинетики сушки, основанных на общих закономерностях процессов, получили импульс интенсивного развития в работах таких известных ученых прошлого века, как Лыков А.В. [1], Гинзбург А.С. [2] и других. Они основывались на использовании теории подобия, которая доказывает, что подобные явления могут характеризоваться числами подобия, величина которых характеризует сложившиеся соотношения между взаимодействующими факторами [3].

В теории подобия доказывается, что в подобных явлениях можно найти определенный набор безразмерных чисел подобия. Каждый процесс характеризуется уравнением подобия, в которое входит некоторый ряд чисел подобия в определенных соотношениях между собой. Фактически такое уравнение – это не что иное, как математическая модель процесса. Например, Пеленко В.В. и др. [12] предлагают следующую математическую модель тепломассопереноса при сушке сухофруктов

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu}_\delta &= f_1(\text{Pn}, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Ko}, \text{Po}, \text{Gu}, \text{We}, \text{D}/\text{H}, \text{D}/\text{L}) \\ \text{Nu} &= f_2(\text{Pn}, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Ko}, \text{Po}, \text{Gu}, \text{We}, \text{D}/\text{H}, \text{D}/\text{L}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

С учетом автомодельности критериев Pr , Pn , Ko и влияния сил поверхностного натяжения обобщенное уравнение тепломассопереноса имеет вид:

$$\text{Nu} = A \text{Po}^m \text{Re}^n \text{Gu}^k \text{We}^s (\text{D}/\text{H})^f (\text{D}/\text{L})^d, \quad (2)$$

где в (1) и (2): Nu и Nu_δ – критерий Нуссельта и диффузионный критерий Нуссельта; Pn – критерий Поснова; Re – критерий Рейнольдса; Gu – критерий Гухмана; We – число Вебера; D/H , D/L – геометрические симплексы, отражающие комплексное влияние размерных характеристик объектов на исследуемый объект.

В представленной обобщенной модели процесса тепломассопереноса при сушке сухофруктов необходимо найти неизвестные эмпирические коэффициенты (A , m , n , k , s , f , d), а также знать значения величин, входящих в критерии подобия.

Другой подход к созданию математических моделей процессов – это решение дифференциальных уравнений второго порядка с учетом условий однозначности [12, 14]. Составляя их в критериальной форме, можно исследовать проблемы тепловлагодпереноса в различных средах.

Из теории сушки известно, что иногда применяются числа подобия, имеющие ту или иную размерность, однако и они могут быть использованы для построения кривых кинетики сушки в обобщенном виде [1, 2, 3]. Например, при сушке конкретного материала, имеющего определенную начальную влажность, при различных режимах обезвоживания сохраняется постоянной величина $N\tau$, соответствующая данной текущей влажности, ω^c :

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \dots = N_n\tau_n = \text{const}, \quad (3)$$

где N_1, N_2, \dots, N_n – скорость сушки в первый период при различных режимах;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – текущее время сушки, в течение которого влажность объекта изменилась от начальной влажности до $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.

Для ряда материалов кривые кинетики сушки обобщают на базе [1]

$$\tau_1/\tau_{q1}=\tau_2/\tau_{q2}=\dots=\tau_n/\tau_{qn}=\text{const}, \quad (4)$$

здесь $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ и $\tau_{q1}, \tau_{q2}, \dots, \tau_{qn}$ – продолжительность достижения $\omega_1^c, \omega_2^c, \dots, \omega_n^c$ и таковая при $\omega_{q1}^c, \omega_{q2}^c, \dots, \omega_{qn}^c$ конкретного процесса, по которому получены экспериментальным путем.

В выражении (4) должно учитываться условие постоянства величин конечной влажности ω_k^c . Также возможно приблизительное постоянство при любом режиме сушки определенного объекта следующих величин [1]:

$$K_1\tau_1=K_2\tau_2=\dots=K_n\tau_n=\text{const}, \quad (5)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициент сушки при различных режимах, характеризующий второй период.

В литературе встречаются и другие методы обобщения кривых кинетики сушки, имеющие и достоинства и определенные недостатки. Однако, на наш взгляд, метод обобщения на базе числовых безразмерных симплексов при изучении тепломассообменных процессов обезвоживания рыбы в сочетании с экспериментальными зависимостями позволяет производить расчеты кинетики, динамики обезвоживания и определять коэффициенты потенцилопроводности тепломассопереноса.

В рыбе в процессе обезвоживания при термическом воздействии окружающей среды происходит ряд сложных биохимических и физико-химических изменений [7], а именно: обезвоживание, уменьшение радиусов пор и капилляров, денатурация и гидролиз белков, липидов и экстрактивных веществ, уменьшение микрофлоры, разрушение витаминов. При гидролизе белков уменьшается содержание азота летучих оснований и увеличивается количество небелкового азота. В результате гидролиза образуются полипептиды различной молекулярной массы и аминокислоты. Часть растворимых белков под действием соли переходит в нерастворимые [15].

Уменьшение размеров микрокапилляров в процессе обезвоживания рыбы приводит к уменьшению коэффициентов потенцилопроводности влагопереноса (коэффициентов диффузии влаги). Вследствие этого в процессах копчения уменьшаются и коэффициенты диффузии копильных компонентов.

В процессах обезвоживания рыбы из нее удаляется в основном влага, удерживаемая силами поверхностного натяжения на поверхности рыбы. Затем уходит влага макрокапилляров и осмотически связанная влага, после чего удаляется влага микрокапилляров. Адсорбционно-связанной влаги в рыбе содержится 8–10% и при производстве даже солено-сушеной или вяленой рыбы технологический процесс завершается до начала удаления этой влаги [2, 7].

На кривых кинетики обезвоживания рыбы характерны две критические точки (рисунок 1). Первая – K_1 – возникает при переходе к началу удаления микрокапиллярной влаги. Вторая – K_2 – образуется при удалении части микрокапиллярной влаги, что не свойственно обычным капиллярно-пористым коллоидным телам. Это явление объясняется усадкой мяса поверхностного слоя рыбы. Микрокапилляры уменьшаются в размере, следовательно, увеличивается энергия связи воды в микрокапиллярах и для ее удаления требуется большая энергия, поэтому после второй критической точки влага удаляется более медленно.

Критические точки K_1 и K_2 в общем случае зависят от режимных параметров, геометрических размеров тела, его химического состава. Для рыбы же критические точки зависят в основном от химического состава [7, 8, 9]:

$$\omega_{k1}^c = 1,069\omega_0^{c,0,969} ; \quad (6)$$

$$\omega_{k2}^c = 0,784\omega_0^c + 2, \quad (7)$$

где ω_{k1}^c – влажность на сухую массу в первой критической точке K_1 на кривой кинетики обезвоживания; ω_{k2}^c – влажность на сухую массу во второй критической точке K_2 на кривой кинетики обезвоживания.

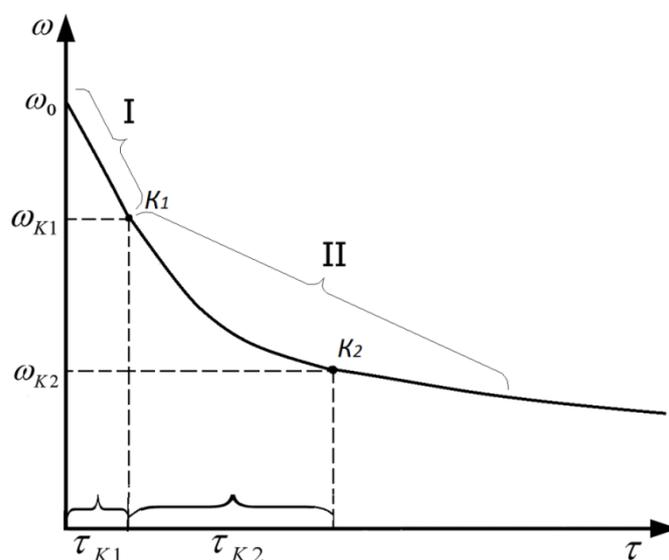


Рисунок 1 – Кривая кинетики обезвоживания.

I – период постоянной скорости обезвоживания (период разогрева из-за его малости не учтен); *II* – период падающей скорости обезвоживания

Из уравнений (6) и (7) очевидно, что критические влажности ω_{k1}^c и ω_{k2}^c являются функцией начальной влажности ω_0^c , с другой стороны, ω_{k1}^c и τ_{k1} , ω_{k2}^c и τ_{k2} на кривых кинетики обезвоживания являются координатами критических точек K_1 и K_2 , характеризующих влияние режимных параметров, геометрических размеров тела и химического состава, а также изменение внутренних свойств продукта на скорость обезвоживания.

Продолжительность обезвоживания τ_{k1} до первой критической влажности ω_{k1}^c обратно пропорциональна скорости обезвоживания N в период постоянной скорости обезвоживания $\tau_{k1} = \phi\left(\frac{1}{N}\right)$. В свою очередь, скорость обезвоживания N зависит от химического состава продукта (в данном случае от начальной влажности материала), геометрических размеров тела и режимных параметров сушильного агента. Следовательно, и продолжительность τ_{k1} зависит от всех перечисленных выше факторов [6, 7, 8, 9, 11].

Продолжительность τ_{k1} достижения первой критической влажности ω_{k1}^c обратно пропорциональна скорости обезвоживания N в период постоянной скорости. Отсюда следует, что τ_{k1} учитывает влияние на процесс химического состава сырья, его геометрических размеров и режимных параметров.

Продолжительность τ_{k2} , продолжительность обезвоживания между первой критической точкой K_1 и второй критической точкой K_2 позволяет косвенно оценить величину изменений внутренних свойств материала в процессе термической обработки.

Отсюда можно сделать вывод, что, вероятно, процесс обезвоживания рыбы следовало бы изучать в безразмерных координатах, используя следующие безразмерные симплексы:

$$\frac{\omega}{\omega_{k1}}, \frac{\omega}{\omega_{k1} \omega_{k2}}, \frac{\tau}{\tau_{k1}}, \frac{\tau}{\tau_{k1} \tau_{k2}}, \frac{a_m}{a_{m_{k1}}}, \frac{a_m}{a_{m_{k2}}}, \quad (8)$$

$a_m, a_{m_{k1}}, a_{m_{k2}}$ – коэффициенты диффузии влаги при влажностях $\omega^c, \omega_{k1}^c, \omega_{k2}^c$, соответственно.

Однако для того, чтобы в последующем пользоваться обобщенными уравнениями при расчете конкретных процессов, необходимо знать зависимость либо скорости обезвоживания N , либо продолжительность достижения какой-либо конкретной влажности от химического состава, геометрических размеров тела и режимных параметров.

При обобщении множества подобных явлений обезвоживания в процессах вяления, холодного, полугорячего, горячего копчения, а также обжаривания рыбы на базе безразмерных чисел подобия (8) нами были найдены математические модели кинетики обезвоживания рыбы в указанных выше процессах:

а) обжаривание [6]

$$\tau = \tau_{k1} + \sqrt{\tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp\left[\frac{1}{b}\left(a - \frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c}\right)\right]}, \quad (9)$$

где а и b – коэффициенты (а=0,946, b=0,048 при обезвоживании в пределах от $\omega_{k1}^c, \omega_{k2}^c$; а=0,982, b=0,098 при обезвоживании в пределах от ω_{k2}^c до конечной влажности ω_k^c);

б) вяление и холодное копчение [7, 8]

$$\tau = \left[\tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp\left(6,84 - 6,3 \frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}\right) \right]^{0,5}; \quad (10)$$

в) полугорячее и горячее копчение [9, 10]

$$\tau = \left\{ \tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp\left[3,97 - 3,88\left(\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}\right)^2\right] \right\}^{0,5}. \quad (11)$$

В выражении (9) была использована для обобщения процесса зависимость $\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} = \phi\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$,

а в уравнениях (10) и (11) – $\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$. Обобщенная зависимость $\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$

на примере (11) приведена на рисунке 2, из которого видно, что экспериментальные точки, полученные при исследовании закономерностей обезвоживания в процессах горячего и полугорячего копчения (сушки), расположены вокруг одной кривой. Критерий Фишера при этом составляет более 2400, значимость числовых коэффициентов – примерно 100%, что позволяет утверждать о взаимосвязи данных величин [9].

Чтобы найти произведение $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ из выражения (9), (11), необходимо сначала определить τ_{k1} из выражения:

$$\tau_{k1} = \frac{\omega_0^c - \omega_{k1}^c}{N}. \quad (12)$$

Для определения скорости обезвоживания N в процессах обжаривания предложено следующее эмпирическое выражение [6]:

$$N = -36,6 + 0,18\omega_0^c + 63,5\left(\frac{S}{m} - 0,171\right) + 0,67(T_M - 423), \quad (13)$$

где ω_0^c – начальная влажность рыбы на сухую массу, %; $\frac{S}{m}$ – удельная поверхность рыбы, м²/кг; T_M – температура масла при обжаривании, К.

Пределы применения уравнения (13): $230 \leq \omega_0^c \leq 430$ %; $0,12 \leq \frac{S}{m} \leq 0,234$ м²/кг; $403 \leq T_M \leq 463$ К.

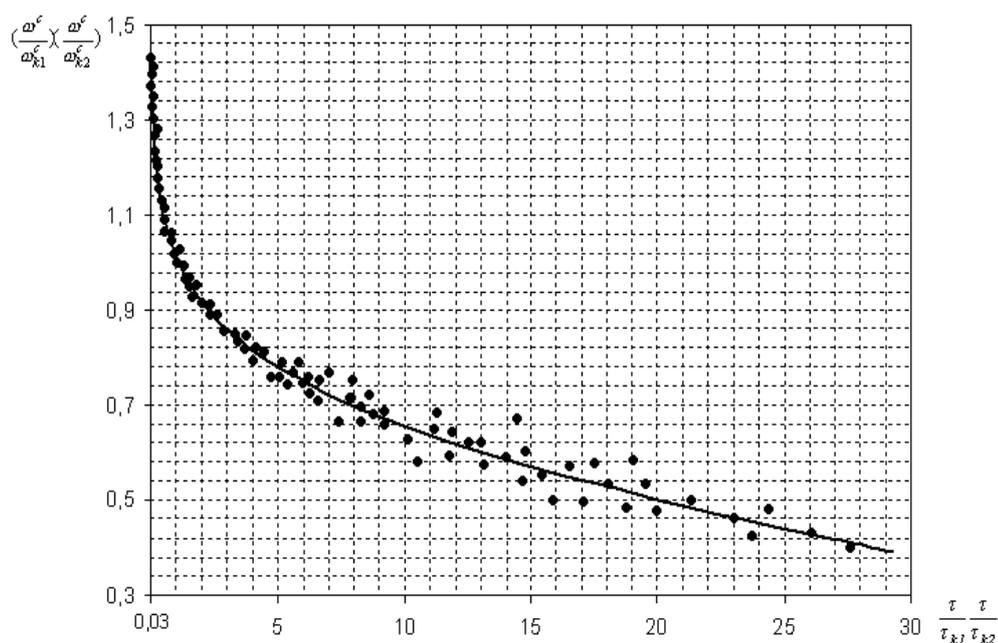


Рисунок 2 – Зависимость $\frac{\omega^c}{\omega^c_{k1}} \frac{\omega^c}{\omega^c_{k2}} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$

Продолжительность обезвоживания τ_{k2} от ω^c_{k1} до ω^c_{k2} находим из следующего выражения:

$$\tau_{k2} = \tau_{k1} \exp\left(\frac{1}{0,098} \left(0,982 - \frac{\omega^c_{k2}}{\omega^c_{k1}}\right)\right). \tag{14}$$

Для определения произведения $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ в выражении (10) необходимо найти влажность рыбы через 24, 48 или 6 часов обезвоживания и подставить эти значения τ и ω^c в уравнение (10).

Значения ω^c и τ находим из уравнений [7, 8]:

$$\omega^c_{(\tau=24)} = \omega^c_1 - 3,024 X_p^{0,25} (\omega^o_0 - 50) \left(10 \frac{S}{m} - 0,6\right)^{0,5}, \tag{15}$$

$$\omega^c_{(\tau=48)} = \omega^c_1 - 3,792 X_p^{0,25} (\omega^o_0 - 50) \left(10 \frac{S}{m} - 0,6\right)^{0,5}, \tag{16}$$

$$\omega^c_{(\tau=6)} = \omega^c_1 - \frac{1,158 X_p^{0,25} (\omega^o_0 - 50)}{1 - 1,591 \frac{S}{m} + 0,848 \left(\frac{S}{m}\right)^2}, \tag{17}$$

здесь $X_p = \bar{t} \left(1 - \frac{\bar{\phi}}{100}\right)$ – жесткость режима (\bar{t} – средняя температура, °С и $\bar{\phi}$ – средняя относительная влажность, %, за процесс); $\frac{S}{m}$ – удельная поверхность рыбы, м²/кг; ω^o_0 – начальная влажность рыбы на общую массу, %.

Выражения (15) и (16) справедливы при выполнении следующих условий:

$$68 \leq \omega^o_0 \leq 78\%; \quad 0,11 \leq \frac{S}{m} \leq 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}; \quad 5 \leq X_p \leq 22.$$

Область применения уравнения (17) лежит в пределах:

$$68 \leq \omega^o_0 \leq 78\%; \quad 0,23 \leq \frac{S}{m} \leq 0,73 \text{ м}^2/\text{кг}; \quad 5 \leq X_p \leq 22.$$

Определяя продолжительность обезвоживания в процессах полугорячего и горячего копчения [9, 10] из выражения (11), необходимо найти скорость обезвоживания N в первый период

$$N = \psi(\omega_0^c, \frac{S}{m}, X_p, v), \quad (18)$$

где ω_0^c – начальная влажность рыбы, %; $\frac{S}{m}$ – удельная поверхность рыбы, м²/кг; X_p – жесткость режима;

v – скорость движения сушильного агента, м/с.

Для жирных видов рыб:

$$N=1,0+0,016(\omega_0^c -180)+24,2(\frac{S}{m} -0,185)+0,131(X_p -30)+0,350(v-2,0). \quad (19)$$

Предел применимости уравнения (19):

$$180 \leq \omega_0^c \leq 300 \% ; 0,19 \leq \frac{S}{m} \leq 0,34 \text{ м}^2/\text{кг}; 30,25 \leq X_p \leq 52,50 ; 2 \leq v \leq 10 \text{ м/с}.$$

Для тощих видов рыб:

$$N=2,9+0,016(\omega_0^c -300)+24,2(\frac{S}{m} -0,185)+0,131(X_p -30)+0,350(v-2,0). \quad (20)$$

Предел применимости (20):

$$300 \leq \omega_0^c \leq 500 \% ; 0,19 \leq \frac{S}{m} \leq 0,34 \text{ м}^2/\text{кг}; 30,25 \leq X_p \leq 52,50 ; 2 \leq v \leq 10 \text{ м/с}.$$

Продолжительность обезвоживания τ_{k2} от первой критической точки K_1 до второй критической точки K_2 находим из выражения [9, 10]

$$\tau_{k2} = \frac{\tau_{k1}}{\exp 3,968 - 3,883(\omega_{k1}^c / \omega_{k2}^c)^2}. \quad (21)$$

Подставив τ_{k1} и τ_{k2} в уравнение (11), можно построить конкретную кривую кинетики обезвоживания при полугорячем и горячем копчении рыбы.

Используя числа подобия $\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}}$ и $\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}$, было получено уравнение обобщенной зависимости коэффициентов потенциалопроводности массопереноса для процессов вяления и холодного копчения:

$$a_m = \left[a_{m_{k1}} \cdot a_{m_{k2}} \exp(6,32 \frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c} - 6,36) \right]^{0,5}. \quad (22)$$

Если найти произведение $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ в выражениях (9) – (11) или $a_{m_{k1}} \cdot a_{m_{k2}}$ в (22), то представляется возможным находить конкретные зависимости $\omega^c = f(\tau)$ или $a_m = f(\omega^c)$ в процессе вяления и холодного копчения.

Представляет интерес, возможно ли обобщение коэффициентов диффузии влаги в процессах вяления, холодного, полугорячего и горячего копчения, а также обжаривания одной обобщенной

зависимостью $\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = \psi\left(\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}\right)$.

Данная зависимость приведена на рисунке 2. Множество экспериментальных точек, как видно из рисунка 2, лежит вокруг одной кривой. Критерий Фишера достаточно высок – более 640, что позволяет говорить о взаимосвязи этих величин. Математически кривую, приведенную на рисунке 2, можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \exp\left(5,73 \frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}\right). \tag{23}$$

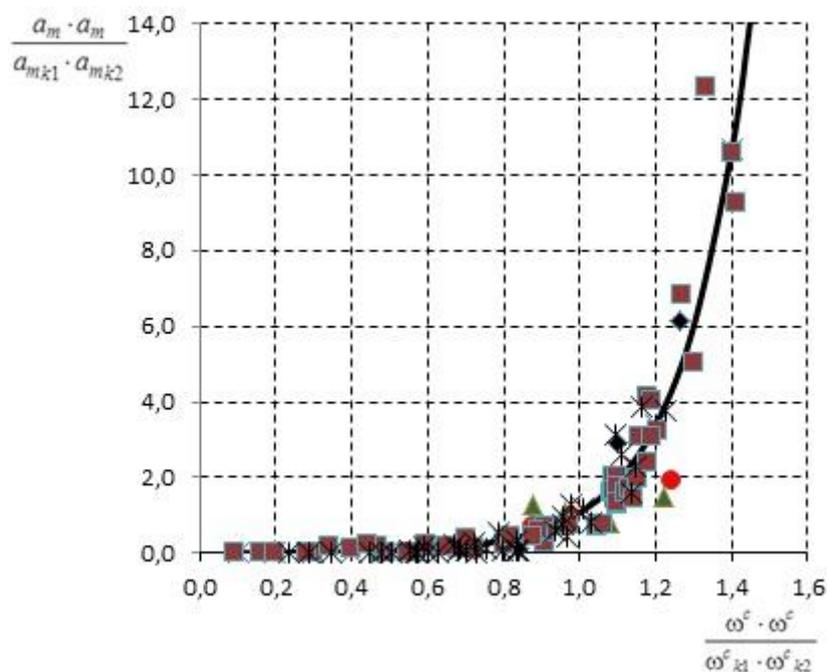


Рисунок 3 – Зависимость $\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = \psi\left(\frac{\omega^c}{\omega_{k1}^c} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}^c}\right)$

Для определения произведения $a_{m_{k1}} \cdot a_{m_{k2}}$ необходимо найти экспериментальным путем одно значение коэффициента потенциалопроводности масопереноса a_m при конкретной влажности ω^c и подставить эти значения в уравнение (22) для вяления и холодного копчения или в (23) – для всех рассматриваемых процессов.

Таким образом, уравнения (9) – (11), (22), (23) являются обобщенными выражениями множества зависимостей $\omega^c = f(\tau)$ и $a_m = \psi(\omega^c)$.

Заключение

Использование безразмерных чисел подобия (симплексов) в анализе обезвоживания рыбы при ее тепловой обработке позволяет получать достаточно простые математические модели. В сочетании с уравнениями, найденными эмпирическим путем, эти математические модели открывают уникальную возможность нахождения кривых кинетики обезвоживания расчетным путем. Найденные авторами обобщенные зависимости для процессов вяления, холодного, полугорячего, горячего копчения и обжаривания рыбы, позволяют не только рассчитать кинетику и динамику обезвоживания, но и разрабатывать оптимальные режимы обезвоживания для конкретных промышленных установок.

Литература

1. *Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. *Гинзбург А.С., Савина И.М.* Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 280 с.
3. *Стабников В.Н.* Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Пищевая промышленность, 1976. 664 с.
4. *Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А.* Моделирование процессов пищевых производств: учеб. пособие для вузов. М.: Колос, 2008. 358 с.
5. *Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А., Похольченко В.А.* Процессы сушки, копчения, вяления рыбы и их аппаратное оформление. Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. 220 с.
6. *Ершов А.М.* Исследование тепло- и массообмена при обжаривании рыбы в растительном масле с использованием инфракрасного излучения: дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 205 с.
7. *Ершов А.М.* Развитие и совершенствование процессов холодного копчения на основе интенсификации массопереноса влаги и коптильных компонентов: дис. ... д-ра техн. наук. Мурманск: МГАРФ, 1992. 250 с.
8. *Ершов М.А.* Совершенствование методов расчета обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы: дис. ... канд. техн. наук. Мурманск: МГТУ, 2007. 160 с.
9. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В.* Решение задачи диффузии в мембране применительно к разделению эмульсий // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 1. С.11–14.
10. *Похольченко В.А.* Совершенствование процессов копчения рыбы при производстве консервов // Монография. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2010. 100 с.
11. *Похольченко В.А., Ершов А.М., Ершов М.А.* Кинетика процессов обезвоживания и нагрева рыбы при обжаривании, полугорячем и горячем копчении // Вестник ВГУИТ. 2014. № 1. С. 31–35.
12. *Пеленко В.В., Дайнеко К.Э., Иваненко В.П., Крысин А.Г., Пеленко Ф.В., Кайка А.Х., Тарабановский Ф.Б.* Учет сил поверхностного натяжения в математической модели тепло-массопереноса при сушке поверхностной влаги сухофруктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4. С. 23.
13. *Вороненко Б.А., Гусев Б.К., Пеленко В.В., Стариков В.В.* Аналитическое решение задачи совместного тепло- и массопереноса в процессе горячей сушки мясных и рыбных продуктов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 9. С. 171–176.
14. *Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Стариков В.В.* Аналитическое решение задачи совместного тепломассопереноса при инфракрасном нагреве колбасных изделий // Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 2. С.7–13.
15. *Артюхова С.А.* Технология рыбы и рыбных продуктов: учебник для вузов / под ред. А.М. Ершова. М.: Колос, 2010. 1064 с.
16. *Леванидов И.П., Ионас Г.Я., Слуцкая Т.П.* Технология соленых, копченых и вяленых рыбных продуктов. М.: Агропромиздат, 1987. 160 с.

References

1. *Lykov A.V. Teoriya sushki* [Drying theory]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 472 p.
2. *Ginzburg A.S., Savina I.M. Massovlagoobmennye kharakteristiki pishchevykh produktov* [Massovlagoobmennye characteristics of foodstuff]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1982. 280 p.
3. *Stabnikov V.N. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food productions]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1976. 664 p.
4. *Glazunov Yu.T., Ershov A.M., Ershov M.A. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food productions]. Manual for higher education institutions. Moscow, Kolos Publ., 2008, 358 p.
5. *Glazunov Yu.T., Ershov A.M., Ershov M.A., Pokhol'chenko V.A. Protsessy sushki, kopcheniya, vyaleniya ryby i ikh apparaturnoe oformlenie* [Processes of drying, smoking, vyaleniye of fish and their hardware registration]. Kaliningrad, FGBOU VPO «KGTU» Publ., 2013, 220 p.
6. *Ershov A.M. Issledovanie teplo- i massoobmena pri obzharivanii ryby v rastitel'nom masle s ispol'zovaniem infrakrasnogo izlucheniya* [Research warm and a mass exchange when frying fish in vegetable oil with use of infrared]. *Candidate's thesis*. Moscow, 1982, 205 p.
7. *Ershov A.M. Razvitie i sovershenstvovanie protsessov kholodnogo kopcheniya na osnove intensifikatsii massoperenosa vlagi i koptil'nykh komponentov* [Development and improvement of processes based on cold-

- smoked intensification of mass transfer of moisture and smoking components]. *Doctor's thesis*. Murmansk, MGARF Publ., 1992, 250 p.
8. Ershov M.A. Sovershenstvovanie metodov rascheta obezvozhivaniya v protsessakh kholodnogo kopcheniya i vyaleniya ryby [Improvement of methods of calculation of dehydration in processes of cold smoking and a vyaleniye of fish]. *Candidate's thesis*. Murmansk, MGTU Publ., 2007, 160 p.
 9. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V. Reshenie zadachi diffuzii v membrane primenitel'no k razdeleniyu emul'sii [The solution of a problem of diffusion in a membrane in relation to division of emulsions]. *Processes and equipment for food production*. 2011, no. 1, pp.11–14.
 10. Pokhol'chenko V.A. Sovershenstvovanie protsessov kopcheniya ryby pri proizvodstve konservov [Improvement of processes of smoking of fish by production of canned food]. Murmansk, MGTU Publ., 2010, 100 p.
 11. Pokhol'chenko V.A., Ershov A.M., Ershov M.A. Kinetika protsessov obezvozhivaniya i nagreva ryby pri obzharivanii, polugoryachem i goryachem kopchenii [Kinetics of processes of dehydration and heating of fish when frying, semi-hot and hot smoking]. *Vestnik VGUIT*. 2014, no. 1, pp. 31–35.
 12. Pelenko V.V., Daineko K.E., Ivanenko V.P., Krysin A.G., Pelenko F.V., Kaika A.Kh., Tarabanovskii F.B. Uchet sil poverkhnostnogo natyazheniya v matematicheskoi modeli teplo-massoperenosa pri osushke poverkhnostnoi vlagi sukhofruktov [Accounting for surface tension forces in the mathematical model of heat and mass transfer when the drying of moisture with surface dried fruit]. *Scientific journal NRU ITMO, series Processes and equipment for food production*. 2013, no. 4, P. 23.
 13. Voronenko B.A., Gusev B.K., Pelenko V.V., Starikov V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi sovmestnogo teplo- i massoperenosa v protsesse goryachei sushki myasnykh i rybnykh produktov [The analytical solution of a task joint warm and a mass transfer in the course of hot drying of meat and fish products]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2009, no. 9, pp. 171–176.
 14. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Starikov V.V. Analiticheskoe reshenie zadachi sovmestnogo teplo- i massoperenosa v protsesse goryachei sushki myasnykh i rybnykh produktov [The analytical solution of a task joint warm and a mass transfer when infrared heating of sausages]. *Processes and equipment for food production*. 2009, no. 2, pp.7–13.
 15. Artyukhova S.A. *Tekhnologiya ryby i rybnykh produktov [Technology of fish and fish products]*. Textbook for high schools red. A.M. Ershova. Moscow, Kolos Publ., 2010, 1064 p.
 16. Levanidov I.P., Ionas G.Ja., Sluckaja T.P. *Tekhnologiya solenykh, kopchenykh i vyalenykh rybnykh produktov [Technology salted, smoked and dried fish products]*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987, 160 p.

Статья поступила в редакцию 19.05.2015