

УДК 664.8 : 95 + 66-93

Заведующий кафедрой В.А. Похольченко

(Мурманский гос. техн. университет) кафедра технологического и холодильного оборудования. тел. (8152) 40-32-82

E-mail: pokholchenkova@mstu.edu.ru

главный научный сотрудник А.М. Ершов,

старший научный сотрудник М.А. Ершов

(Мурманский гос. техн. университет) кафедра технологий пищевых производств. тел. (8152) 40-33-26

E-mail: ershovma@mstu.edu.ru

Head of the department V.A. Pokhol'chenko

(Murmansk, Russia. State Technical University) Department of processing and refrigerating appliances. phone (8152) 40-32-82

E-mail: pokholchenkova@mstu.edu.ru

chief researcher A.M. Ershov, senior scientist M.A. Ershov

(Murmansk, Russia. State Technical University) Department of technology of food manufactures. phone (8152) 40-33-26

E-mail: ershovma@mstu.edu.ru

Особенности обобщения подобных явлений в процессах тепловой обработки рыбы

Peculiarities of generalization of similar phenomena in the process of fish heat treatment

Реферат. Рассмотрены теоретические предпосылки возможности обобщения и выявления подобия в процессах обезвоживания и нагрева влажных материалов. Предложено проводить обобщение данных процессов на базе безразмерных чисел подобия. При глубоком анализе закономерностей протекания процессов холодной, полугорячей, горячей сушки (копчения) и обжаривания рыбы удалось значительное количество полученного опытного материала обобщить на базе безразмерных симплексов. Применение чисел подобия позволило выявить для описания изучаемых явлений ряд несложных математических моделей. Разработаны обобщенные кинетические зависимости обезвоживания рыбы, обобщенные динамические зависимости (изменения коэффициентов диффузии влаги), обобщенные кинетические модели нагрева рыбы (изменения температурного поля по толщине продукта, температуры среднеобъемной и в центре продукта). Полученные обобщенные математические зависимости учитывают также взаимосвязь процессов обезвоживания и нагрева при полугорачем, горячем копчении (сушке) и обжаривании. Приведена взаимосвязь полученных результатов с физической сущностью процессов обезвоживания, включая изменение энергии связи влаги с материалом по мере протекания процесса, а также влияние усадки продукта на скорость удаления влаги. Приведены факторы, оказывающие влияние на изменение внутренней структуры и свойств материала, замедляющие процесс обезвоживания. Отмечена зависимость темпа нагрева рыбных продуктов от химического состава, геометрических размеров объекта нагрева и от режимных параметров теплоносителя. Открыта уникальная возможность при использовании обобщенных моделей, в сочетании с полученными эмпирическим путем уравнениями и разработанными методиками инженерного расчета данных процессов, проектировать рациональные режимы тепловой обработки сырья и оптимизировать работу теплового оборудования.

Summary. The theoretical presuppositions for the possibility of generalizing and similarity founding in dehydration and wet materials heating processes are studied in this article. It is offered to carry out the given processes generalization by using dimensionless numbers of similarity. At the detailed analyzing of regularities of heat treatment processes of fish in different modes a significant amount of experienced material was successfully generalized on the basis of dimensionless simplex (similarity numbers). Using the dimensionless simplex allowed to detect a number of simple mathematical models for the studied phenomena. The generalized kinetic models of fish dehydration, the generalized dynamic models (changing moisture diffusion coefficients), the generalized kinetic models of fish heating (the temperature field changing in the products thickness, average volume and center) were founded. These generalized mathematical models showed also relationship of dehydration and heating at the processes of fish semi-hot, hot smoking (drying) and frying. The relationship of the results from the physical nature of the dehydration process, including a change in the binding energy of the moisture with the material to the extent of the process and the shrinkage impact on the rate of the product moisture removal is given in the article. The factors influencing the internal structure and properties of the raw material changing and retarding the dehydration processes are described there. There was a heating rate dependence of fish products on the chemical composition the geometric dimensions of the object of heating and on the coolant regime parameters. A unique opportunity is opened by using the generalized models, combined with empirically derived equations and the technique of engineering calculation of these processes, to design a rational modes of heat treatment of raw materials and to optimize the performance of thermal equipment.

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

Keywords: dehydration, drying, smoking, frying, operating parameters, moisture diffusion, critical moisture content, generalized dependence, similarity number, dimensionless simplex.

© Похольченко В.А., Ершов А.М., Ершов М.А., 2015

При разработке приближенных расчетных методик определения кинетики сушки, основанных на общих закономерностях процессов импульс интенсивного развития отражен в работах таких известных ученых прошлого века, как Лыков А.В., Гинзбург А.С. [1, 2] и др.

Исследования основывались на использовании теории подобия, где доказывалось, что подобные явления характеризуются числами подобия, величина которых характеризует сложившиеся соотношения между взаимодействующими факторами [3]. В теории подобия доказывалось, что в подобных явлениях может быть найден определенный набор безразмерных чисел подобия. Каждый процесс характеризуется уравнением подобия, включающим ряд чисел подобия в определенных соотношениях между собой. Такое уравнение представляет собой, по сути, математическую модель процесса.

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].

Обобщение множества подобных явлений обезвоживания в процессах вяления, холодного, полугорячего, горячего копчения, а также обжаривания рыбы нами предлагается проводить на базе следующих безразмерных чисел подобия [4, 5, 6]:

$$\frac{\omega}{\omega_{k1}}, \frac{\omega}{\omega_{k1} \omega_{k2}}, \frac{\tau}{\tau_{k1}}, \frac{\tau}{\tau_{k1} \tau_{k2}}, \frac{a_m}{a_{m_{k1}}}, \frac{a_m}{a_{m_{k2}}}, \quad (1)$$

где τ_{k1} - продолжительность обезвоживания от начальной влажности ω_0 до влажности в ω_{k1} первой критической точки K_1 на кривой кинетики обезвоживания (рисунок 1); τ_{k2} - продолжительность обезвоживания от первой критической точки K_1 с влажностью ω_{k1} до второй критической точки K_2 с влажностью на ω_{k2} кривой кинетики обезвоживания (рисунок 1); $a_{m_{k1}}$, $a_{m_{k2}}$ - коэффициенты потенциалопроводности влагопереноса в точках K_1 и K_2 на кривой кинетики обезвоживания; τ , ω , a_m - текущие значения продолжительности обезвоживания, влажности, коэффициента потенциалопроводности влагопереноса, соответственно. Здесь влажности ω , ω_{k1} , ω_{k2} рассматриваются как количество влаги в рыбе, отнесенное к массе сухого вещества, %.

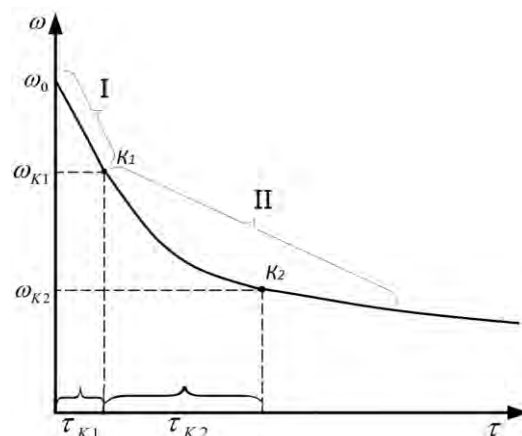


Рисунок 1. Кривая кинетики обезвоживания: I — период постоянной скорости обезвоживания (период разогрева из-за его малости не учтен); II — период падающей скорости обезвоживания

Используя представленные числа подобия, были найдены математические модели кинетики обезвоживания рыбы в указанных выше процессах [6]:

а) для процесса обжаривания:

$$\tau = \tau_{k1} + \sqrt{\tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp\left[\frac{1}{b} \left(a - \frac{\omega}{\omega_{k1}}\right)\right]}, \quad (2)$$

где a и b — коэффициенты ($a=0,946$, $b=0,048$ при обезвоживании в пределах от ω_{k1} , ω_{k2} ; $a=0,982$, $b=0,098$ при обезвоживании в от ω_{k2} до конечной влажности ω_k);

б) для процессов вяления и холодного копчения:

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

в) для процессов полугорячего и горячего копчения:

$$\tau = \left\{ \tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp\left[3,99 - 3,88 \left(\frac{\omega}{\omega_{k1} \omega_{k2}}\right)^2\right] \right\}^{0,5}. \quad (4)$$

В выражении (2) была использована для обобщения процесса зависимость $\frac{\omega}{\omega_{k1}} = \varphi\left(\frac{\tau}{\tau_{k1} \tau_{k2}}\right)$,

а в уравнениях (3) и (4) — $\frac{\omega}{\omega_{k1} \omega_{k2}} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1} \tau_{k2}}\right)$.

Последняя на примере уравнения (4) 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 [4]. Критерий Фишера при этом составляет более 2400, значимость числовых

коэффициентов - примерно 100 %, что позволяет утверждать о взаимосвязи данных величин.

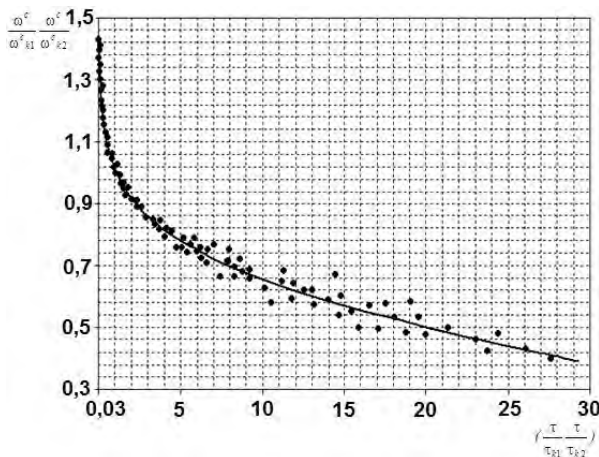


Рисунок 2. Зависимость $\frac{\omega^c}{\omega_{k1}} \frac{\omega^c}{\omega_{k2}} = f\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$

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

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

Если найти произведение $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ в выражениях (2)-(4) или $a_{m_{k1}} \cdot a_{m_{k2}}$ в (5), то представляется возможным находить конкретные зависимости $\omega = f(\tau)$ или $a_m = f(\omega)$ в процессе вяления и холодного копчения.

Представляет интерес, а возможно ли обобщение коэффициентов диффузии влаги в процессах вяления, холодного, полугорячего и горячего копчения, а также обжаривания одной обобщенной зависимостью $\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = \psi\left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}\right)$.

Данная зависимость приведена на рисунке 3. Множество экспериментальных точек, как видно из рисунка, лежит вокруг одной кривой. Критерий Фишера достаточно высок, более 640, что свидетельствует о том, что эти величины взаимосвязаны. Математически кривую, приведенную на рисунке 3, можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \exp\left(5,73 \frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}\right) \quad (6)$$

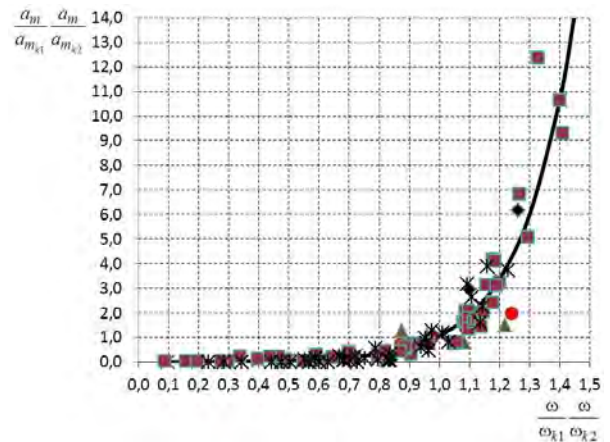


Рисунок 3. Зависимость $\frac{a_m}{a_{m_{k1}}} \frac{a_m}{a_{m_{k2}}} = \psi\left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}\right)$

Критические влажности ω_{k1} и ω_{k2} при обезвоживании рыбы не зависят от режимных параметров, геометрических размеров ее, способа или метода энергоподвода. Они зависят в основном от ее химического состава.

В рыбе из всех химических соединений преобладает вода, поэтому предпочтительно найти изменение критических влажностей от начального содержания влаги ω_0 , %. Эта зависимость статистически достоверно выражается следующими выражениями [6]:

$$\omega_{k1} = 1,069 \omega_0^{0,969}; \quad (7)$$

$$\omega_{k2} = 0,784 \omega_0 + 2. \quad (8)$$

Чтобы найти произведение $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ из выражения (2), необходимо сначала найти τ_{k1} из выражения:

$$\tau_{k1} = \frac{\omega_0 - \omega_{k1}}{N}, \quad (9)$$

здесь N - скорость обезвоживания в первый период тепловой обработки рыбы (период постоянной скорости обезвоживания). Остальные обозначения известны.

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

$$N = -36,6 + 0,18 \omega_0 + 63,5 \left(\frac{S}{m} - 0,171 \right) + 0,67(T_m - 423) \quad (10)$$

где ω_0 - начальная влажность рыбы на сухую массу, %; S/m - удельная поверхность

рыбы, м²/кг; T_m - температура масла при обжаривании, К.

Пределы применения уравнения (10):
 $230 \leq \omega_0 \leq 430\%$; $0,12 \leq S/m \leq 0,234$ м²/кг;
 $403 \leq T_m \leq 463\text{K}$;

Продолжительность обезвоживания τ_{k2} от ω_{k1} до ω_{k2} находим из следующего выражения:

$$\tau_{k2} = \tau_{k1} \exp\left(\frac{1}{0,098} \left(0,982 - \frac{\omega_{k2}}{\omega_{k1}}\right)\right). \quad (11)$$

Для определения произведения $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ в выражении (3) необходимо найти влажность рыбы через 24, 48 или 6 часов обезвоживания и подставить эти значения τ и ω в уравнение (3).

Значения ω и τ находим из уравнений:

$$\omega_{(\tau=24)} = \omega_1 - 3,024 X_p^{0,25} (\omega_0^o - 50) \left(10 \frac{S}{m} - 0,6\right)^{0,5}, \quad (12)$$

$$\omega_{(\tau=48)} = \omega_1 - 3,792 X_p^{0,25} (\omega_0^o - 50) \left(10 \frac{S}{m} - 0,6\right)^{0,5}, \quad (13)$$

$$\omega_{(\tau=6)} = \omega_1 - \frac{1,158 X_p^{0,25} (\omega_0^o - 50)}{1 - 1,591 \frac{S}{m} + 0,848 \left(\frac{S}{m}\right)^2}, \quad (14)$$

здесь $X_p = \bar{t} \left(1 - \frac{\bar{\varphi}}{100}\right)$ - жесткость режима ($\bar{t}$ - средняя температура, °С и $\bar{\varphi}$ - средняя относительная влажность, %, за процесс); S/m - удельная поверхность рыбы, м²/кг; ω_0^o - начальная влажность рыбы на общую массу, %.

Выражения (12) и (13) справедливы при выполнении следующих условий:

$$68 \leq \omega_0^o \leq 78\%; \quad 0,11 \leq S/m \leq 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}; \\ 5 \leq X_p \leq 22.$$

Область применения уравнения (14) лежит в пределах:

$$68 \leq \omega_0^o \leq 78\%; \quad 0,23 \leq S/m \leq 0,73 \text{ м}^2/\text{кг}; \\ 5 \leq X_p \leq 22.$$

Определяя продолжительность обезвоживания в процессах полугорячего и горячего копчения [6] из выражения (9), необходимо найти скорость обезвоживания в первый период $N = \psi(\omega_0, S/m, X_p, v)$, где ω_0 - начальная влажность рыбы, %; S/m - удельная поверхность рыбы, м²/кг; X_p - жесткость режима; v - скорость движения сушильного агента, м/с.

Для жирных видов рыб:

$$N = 1,0 + 0,016(\omega_0 - 180) + 24,2(S/m - 0,185) + 0,131(X_p - 30) + 0,350(v - 2,0). \quad (15)$$

Предел применимости уравнения (15):

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

Для тощих видов рыб:

$$N = 2,9 + 0,016(\omega_0 - 300) + 24,2(S/m - 0,185) + 0,131(X_p - 30) + 0,350(v - 2,0) \quad (16)$$

Предел применимости (16):

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

Продолжительность обезвоживания τ_{k2} от первой критической точки K_1 до второй критической точки K_2 находим из выражения:

$$\tau_{k2} = \frac{\tau_{k1}}{\exp[3,968 - 3,883(\omega_{k1}/\omega_{k2})^2]}. \quad (19)$$

Подставив τ_{k1} и τ_{k2} в уравнение (4), можно построить конкретную кривую кинетики обезвоживания при полугорячем и горячем копчении рыбы.

Для определения произведения $a_{mk1} \cdot a_{mk2}$ необходимо найти экспериментальным путем одно значение коэффициента потенциалопроводности масопереноса a_m при конкретной влажности ω и подставить эти значения в уравнение (5) для вяления и холодного копчения или в (6) - для всех рассматриваемых процессов.

Таким образом, уравнения (2)-(6) являются обобщенными выражениями множества зависимостей $\omega = f(\tau)$ и $a_m = \psi(\omega)$.

Физическая сущность процессов обезвоживания состоит в следующем.

На кривых кинетики обезвоживания рыбы имеются критические точки K_1 и K_2 . Критическая точка K_1 характеризует завершение удаления влаги, удерживаемой на поверхности рыбы силами поверхностного натяжения, влаги макрокапилляров и осмотически связанной. Эти виды влаги имеют наименьшую энергию связи с материалом, поэтому и удаляются в первую очередь. Обычно в капиллярно-пористых коллоидных телах вторая критическая точка возникает при переходе от удаления микрокапиллярной влаги к адсорбционно связанной. Однако адсорбционно связанной влаги в рыбе содержится не более 10 % от общей массы. Конечная же влажность в процессах вяления, холодного, полугорячего, горячего копчения и обжаривания значительно выше. Так почему же при удалении влаги микрокапилляров на кривых кинетики обезвоживания имеет место критическая точка K_2 , которая характерна для случая перехода от удаления влаги с меньшей энергией связи к удалению таковой с большей энергией связи с материалом? При изучении изменения радиуса микрокапил-

ляров в процессе обезвоживания установлено, что радиус капилляров по мере обезвоживания может уменьшаться в 5-7 раз [2, 4, 6]. А чем меньше радиус капилляров, тем выше энергия связи с материалом. Поэтому при достижении в точке K_2 критической влажности ω_{k2} происходит уплотнение продукта и, следовательно, уменьшаются размеры микрокапилляров, особенно в приповерхностных слоях продукта. То есть, в данном случае, τ_{k2} характеризует изменение внутренней структуры материала, его внутренних свойств. Это изменение оказывает влияние на замедление процесса обезвоживания.

Продолжительность обезвоживания τ_{k1} до первой критической влажности ω_{k1} обратно пропорциональна скорости обезвоживания N в период постоянной скорости обезвоживания $\tau_{k1} = \varphi(1/N)$. В свою очередь, скорость обезвоживания N зависит от химического состава продукта (в данном случае от ω_0^o), геометрических размеров тела и режимных параметров сушильного агента. Следовательно, и продолжительность τ_{k1} зависит от всех перечисленных выше факторов.

Из изложенного можно сделать следующий вывод: продолжительность обезвоживания τ_{k1} от начальной влажности ω_0 до первой критической влажности ω_{k1} характеризует влияние на интенсивность процесса обезвоживания химического состава, геометрических размеров тела и параметров сушильного агента, а продолжительность обезвоживания τ_{k2} от первой критической влажности ω_{k1} до второй критической влажности ω_{k2} косвенно учитывает влияние на скорость процесса изменение внутренних свойств материала.

Из уравнений (7), (8) очевидно, что критические влажности ω_{k1} и ω_{k2} являются функцией начальной влажности ω_0 , с другой стороны, ω_{k1} и τ_{k1} , ω_{k2} 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 изменения внутренних свойств продукта на скорость обезвоживания.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование безразмерных чисел подобия на базе (1) в анализе обезвоживания рыбы при ее тепловой обработке позволяет получать достаточно простые математические модели. В сочетании с уравнениями, найденными эмпирическим путем, эти математические модели открыва-

ют уникальную возможность нахождения кривых кинетики обезвоживания расчетным путем.

В тепловых процессах, таких как обжаривание, полугорячее и горячее копчение [6], важно иметь представление о том, как нагревается продукт, с какой скоростью, каковы расходы тепла на процесс, когда наступает кулинарная готовность.

То есть необходимо знать изменения температурного поля по толщине продукта и как изменяются температуры среднеобъемная и в центре продукта.

Темпы нагрева рыбных продуктов в тепловых процессах также зависят от химического состава, геометрических размеров нагреваемого тела и режимных параметров воздействующей на них греющей среды.

Обычно при тепловой обработке пищевых и рыбных продуктов процессы нагрева и обезвоживания взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга. Поэтому следующие безразмерные числа подобия, вероятно, могут быть применены и при выявлении обобщенных кинетических уравнений нагревания рыбы:

$$\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}}; \frac{T_y}{T_{k1}} \frac{T_y}{T_{k2}}; \frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}; \frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}, \quad (15)$$

здесь T – текущая среднеобъемная температура, К; T_y – температура в центре изделия, К; T_{k1} , T_{k2} – среднеобъемные температуры в критических точках K_1 и K_2 кривой обезвоживания, К. Остальные обозначения известны.

Действительно, построив в обобщенных координатах изменение среднеобъемной температуры от степени обезвоживания при обжаривании рыбы и полугорячем копчении ее, все точки статистически достоверно можно отобразить

одной зависимостью $\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = \psi\left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}\right)$, приведенной на рисунке 4.

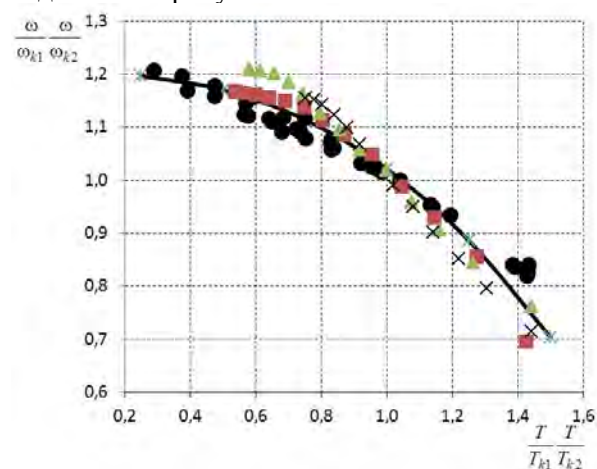


Рисунок 4. Зависимость $\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = \psi\left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}}\right)$

На рисунке 5 приведена кривая кинетики нагрева в обобщенных координатах:

$$\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = \varphi\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right).$$

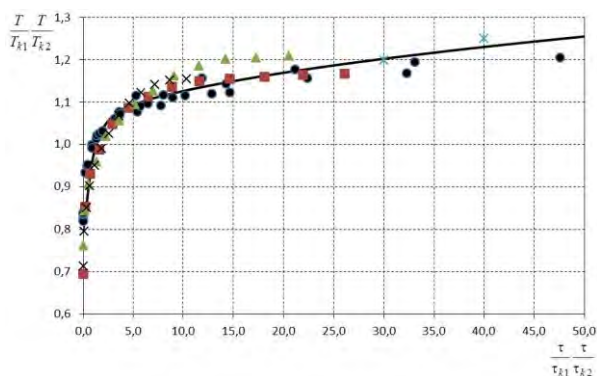


Рисунок 5. Зависимость $\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = \varphi\left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right)$

Статистически достоверно, что множество кривых кинетики нагрева разных процессов сведены в одну обобщенную кривую.

Математические модели нагрева рыбы в обобщенном виде представляются достаточно несложными уравнениями:

$$\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = 1,202 - 0,181 \left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}} \right)^{2,5} ; \quad (17)$$

$$\frac{T}{T_{k1}} \frac{T}{T_{k2}} = 1,022 + 0,033 \left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}} \right)^{0,5} - 0,222 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right). \quad (18)$$

Критерий Фишера для уравнения (17) составляет 1059, а для зависимости (18) – 583. То есть имеет место существенная связь между величинами в обоих уравнениях.

Для многих тепловых процессов необходимо знать температуры в центре продукта от продолжительности процесса (обобщенная зависимость приведена на рисунок 6).

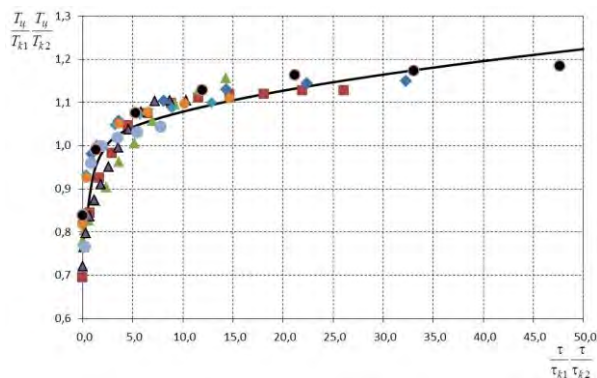


Рисунок 6. Изменение безразмерной температуры в центре продукта от продолжительности процесса

Кроме того, зависимость температуры в центре продукта от степени его обезвоживания также можно отобразить одной зависимостью (представлена на рисунок 7).

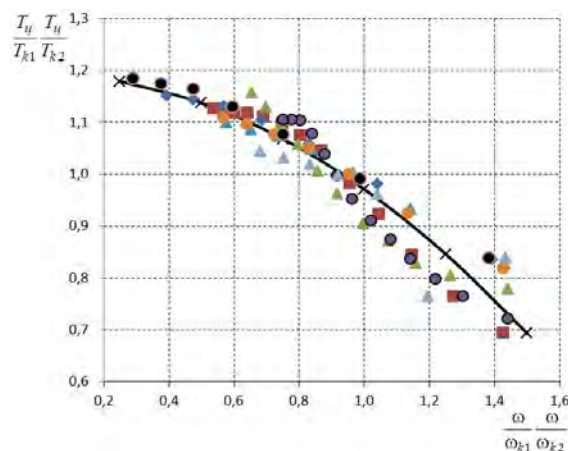


Рисунок 7. Изменение безразмерной температуры в центре продукта от степени обезвоживания

Математическая модель нагрева центральных слоев образцов рыбы в обобщенных координатах, изображенная на рисунок 6, выглядит следующим образом:

$$\frac{T_u}{T_{k1}} \frac{T_u}{T_{k2}} = 0,962 + 0,037 \left(\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}} \right)^{0,5} - 0,193 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{k1}} \frac{\tau}{\tau_{k2}}\right) \quad (19)$$

Математическая модель зависимости, изображенной на рисунок 7, выглядит следующим образом:

$$\frac{T_u}{T_{k1}} \frac{T_u}{T_{k2}} = 1,193 - 0,222 \left(\frac{\omega}{\omega_{k1}} \frac{\omega}{\omega_{k2}} \right)^2. \quad (20)$$

Критерии Фишера также достаточно высоки. Для процессов, изображенных на рисунке 6, он составляет более 382, а для множества процессов, которые описываются одним обобщенным уравнением (20), критерий Фишера равен 607.

В представленных выше уравнениях нахождение произведений $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ и $\omega_{k1} \cdot \omega_{k2}$ уже рассмотрено в данной работе.

Нахождение произведения $T_{k1} \cdot T_{k2}$ нами разобрано в более ранних работах [6]:

$$T_{k1} = T_0 - b_1(\omega_0 - \omega_{k1}), \quad (21)$$

$$T_{k2} = T_{k1} - b_2(\omega_{k1} - \omega_{k2}),$$

где T_0 , T_{k1} , T_{k2} – среднеобъемные температуры изделия в начале нагревания и при достижении критических влажностей ω_{k1} и ω_{k2} , соответственно, К; ω_0 , ω_{k1} , ω_{k2} – начальная, первая и вторая критические влажности, соответственно, %; b_1 , b_2 – температурные коэффициенты температурной кривой.

Для процессов обжаривания:

$$b_1 = 0,909 + 0,47(\tau_{k1} - 1,5) + 0,215(\tau_{k1} - 1,5)(\tau_{k1} - 2), \quad (22)$$

$$b_2 = 0,59 + 0,1033(\tau_{k1} - 1,1), \quad (23)$$

$$b_3 = 0,578\tau_{k1}^{-0,678} \quad (24)$$

Выражения (21)-(24) применимы в пределах от 1,1 мин. $\leq \tau_{k1} \leq 2,5$ мин.

Для процессов полугорячего копчения:

$$b_1 = 2,58 \cdot 0,736^{\tau_{kl}}, \quad (25)$$

$$b_2 = 1,88 \cdot 0,740^{\tau_{kl}}, \quad (26)$$

$$b_3 = 0,095 \exp(3,447 / \tau_{k1}) \quad (27)$$

Область применения уравнений (25)-(27) лежит в пределах 2,5 мин. $\leq \tau_{k1} \leq 7,5$ мин.

ЛИТЕРАТУРА

1 Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.

2 Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагодобменные 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 Ершов А.М., Похольченко В.А., Аминов В.А. Адаптация процессов сушки и копчения к современным аппаратам рыбоперерабатывающих производств // Рыбное хозяйство. 2013. № 6. С. 108-110.

5 Похольченко В.А., Ершов М.А. Повышение энергоэффективности процессов обезвоживания при производстве копченой, вяленой рыбы и полуфабриката для консервов // Научное обозрение. 2012. № 6. С. 164 – 170.

6 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.

Методика нахождения $\tau_{k1} \cdot \tau_{k2}$ приведена выше.

Установлены обобщенные кинетические и динамические закономерности обезвоживания и нагрева рыбы в процессах вяления, холодного, полугорячего, горячего копчения и обжаривания. Полученные обобщенные математические модели, в сочетании с найденными эмпирическим путем уравнениями, открывают уникальную возможность расчета кинетики и динамики обезвоживания рыбы с разработкой оптимальных режимов тепловой обработки продуктов для конкретных промышленных установок.

REFERENCES

1 Lykov A.V. Teoriya sushki [Drying theory]. Moscow, Energiia, 1968, 472 p. (In Russ.)

2 Ginzburg A.S., Savina I.M. Massovlagoodbmennye charakteristiki pishchevykh produktov [Mass- and moisture exchange characteristics of food products]. Moscow, Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost', 1982, 280 p. (In Russ.)

3 Stabnikov V.N. Protcessy i apparty pishchevoi promyshlennosti [Processes and apparatuses of food production]. Moscow, Pishchevaya Promyshlennost', 1976, 664 p. (In Russ.)

4 Ershov A.M., Pokhol'chenko V.A., Aminov V.A. Adaptation of the fish drying and smoking processes for modern fishing industry equipment. *Rybnoe khozyaistvo*. [Fisheries], 2013, no.6, pp. 108-110. (In Russ.).

5 Pokhol'chenko V.A., Ershov M.A. Improving energy efficiency in the production processes of dehydration smoked, dried fish and prepared food for canning. *Nauchnoe obozrenie*. [Science Review], 2012, no.6, pp. 164 – 170. (In Russ.).

6 Pokhol'chenko V.A., Ershov A.M., Ershov M.A. Kinetics processes of dehydration and heating fish during frying, semi-hot and hot smoking. *Vestnik VGUIT*. [Bulletin of VSUET], 2014, no.1, pp. 31-35.