

УДК 664.951.31

Зав. кафедрой В.А. Похольченко

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

E-mail: pokholchenkova@mstu.edu.ru

главн. научн. сотр. А.М. Ершов, ст. научн. сотр. М.А. Ершов

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

E-mail: ershovma@mstu.edu.ru

Head of the department V.A. Pokholchenko

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

E-mail: pokholchenkova@mstu.edu.ru

CSO 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

## **Кинетика процессов обезвоживания и нагрева рыбы при обжаривании, полугорячем и горячем копчении**

### **Kinetics processes of dehydration and heating fish during frying, during semi hot and hot smoking.**

Реферат. Разработаны расчетные методы построения кривых кинетики обезвоживания и нагрева рыбы для процессов обжаривания, полугорячего и горячего копчения. Предлагаемые методы расчета основываются на общих закономерностях тепло-массообмена данных процессов. На основе изучения закономерностей обезвоживания на кривых кинетики выявлены критические точки, характеризующие переход от удаления влаги с меньшей энергией ее связи с материалом к удалению таковой с большей энергией связи, а также влияние усадки продукта на скорость удаления влаги. Эти критические точки характерны и для температурных кривых. Предложено температурную кривую заменить ломаной линией, состоящей из трех прямых, пересекающихся в точках, соответствующих критическим влажностям и критическим температурам. Значительное количество опытного материала по исследованию закономерностей кинетики обезвоживания и нагрева рыбы при различных режимах авторами представлено в виде обобщенных зависимостей. Методика позволяет моделировать процессы нагрева и обезвоживания рыбы и на основе расчетных данных осуществлять выбор наиболее рациональных режимов. Предложенная методика дает возможность расчетным путем строить кривые кинетики нагрева и кинетики обезвоживания в процессах обжаривания, полугорячего и горячего копчения рыбы, что позволяет оптимизировать тот или иной процесс, проектировать более эффективные с точки зрения расхода сырья и энергии технологии, а также создавать более совершенные аппараты или модернизировать существующее оборудование с учетом взаимосвязи тепловых и массообменных процессов.

Summary. Calculated methods of graphing of curves for kinetics of dehydration and fish heating during the processes of frying, semi hot smoking and hot smoking have been developed. The offered methods of calculating are based on the basic regularities of heat and mass exchanges of these processes. Based on the research of the regularities of dehydration on the kinetic curves, critical points were identified, that characterize the transition from the moisture removal with lower energy of its bond with material to the removal of one with higher energy bond, also the influence of the product shrinkage on the velocity of the moisture removal. These points are characteristic for the temperature curves as well. It's suggested for the temperature curve to be replaced by broken line that consists of three straight lines that are crossing in points, corresponded with the critical moistures and critical temperatures. Significant amount of the experimental material of the research of the kinetics of dehydration and fish heating under different modes is shown by authors in the form of generalized dependencies. The method allows modeling the processes of heating and dehydrating of fish and choosing the most rational modes based on the calculated data. The proposed technique makes it possible to construct the curves of the kinetics of heating and dehydration kinetics in processes of roasting, semi hot and hot smoked fish, which allows to optimize a particular process, design more efficient in terms of consumption of raw materials and energy technology, as well as to create better machines or upgrade existing equipment into account the relationship of heat and mass transfer processes.

*Ключевые слова:* кинетика нагрева и обезвоживания, обжаривание, полугорячее, горячее копчение, критические точки, методика расчета.

*Keywords:* heating and dehydration kinetics, frying, semi-hot, hot smoking, critical points, calculation procedure.

© Похольченко В.А., Ершов А.М., Ершов М.А., 2014

Процесс обжаривания среди процессов изготовления пищевых продуктов считается высокотемпературным процессом. Вместе с нагреванием и обезвоживанием рыбы протекает ряд сложных явлений: денатурация и коагуляция белков, впитывание растительного масла, потеря жира и т.п. При этом изменяется поровая структура продукта. Изменение внутренних свойств материала под действием высоких температур влияет и на диффузионные свойства.

Процессы полугорячего и горячего копчения продуктов от холодного копчения отличаются более высокими температурными режимами.

Закономерности процесса удаления влаги из рыбы аналогичны как при холодной сушке (при вялении и холодном копчении температура теплоносителя  $t$  от 17 до 37 °С), так и при полугорячем ( $t$  от 40 до 100 °С), горячем ( $t$  более 100 °С) или обжаривании рыбы в растительном масле ( $t$  от 130 до 180 °С).

Во всех случаях на кривых кинетики обезвоживания наблюдаются критические точки  $K_1$  и  $K_2$ , соответствующие критическим влажностям  $\omega_{K1}$  и  $\omega_{K2}$ . Критические влажности возникают при переходе от удаления влаги с меньшей энергией связи к удалению влаги с большей энергией связи.

В основном, в указанных выше процессах, удаляются следующие виды влаги: влага, удерживаемая силами поверхностного натяжения, влага макрокапилляров, осмотически связанная влага и влага микрокапилляров. Первые три вида влаги удаляются до первой критической точки. Однако в процессе обезвоживания рыбы происходит усадка продукта. Микрокапилляры могут уменьшаться в диаметре, особенно в поверхностных слоях, в 2-8 раз. Поэтому и возникает на кривой кинетики обезвоживания вторая критическая точка при удалении микрокапиллярной влаги. Такое явление не характерно для классических капиллярно-пористых коллоидных тел. Влияние уменьшения размеров капилляров на скорость процесса обезвоживания наиболее сильно сказывается при холодном копчении и вялении рыбы. Естественно, изменяются и диффузионные свойства ее. Коэффициенты при теплопроводности массопереноса также уменьшаются [1].

Продолжительность указанных выше процессов зависит от химического состава, геометрических размеров рыбы и режимных параметров воздействующей на продукт среды.

К основному параметру, учитывающему химический состав рыбы, относят начальную влажность рыбы ( $\omega^0$ ). Геометрические разме-

ры тела объективно характеризует удельная поверхность рыбы ( $S/m$ ). К режимным параметрам относят температуру воздействующей среды ( $t$ ), относительную влажность ее ( $\phi$ ), скорость движения ( $v$ ) относительно продукта.

В процессах обезвоживания рыбы принято режимные параметры  $\bar{t}$  и  $\bar{\phi}$  (соответственно средние температура и относительная влажность в камере) объединять в один, который назван жесткостью режима [2]

$X_p = \bar{t}(1 - \bar{\phi}/100)$ , а влияние скорости ( $v$ ), воздействующей на продукт среды, относящейся к режимным параметрам, учитывать отдельно. Это вызвано тем, что в некоторых случаях влиянием скорости ( $v$ ) на интенсивность процессов обезвоживания можно пренебречь.

В процессах тепловой обработки рыбы, таких как полугорячее, горячее копчение и обжаривание требуется знать, как изменяется среднеобъемная температура тела. Знание конечной среднеобъемной температуры необходимо при конструировании тепловых аппаратов.

В процессе эксплуатации тепловых аппаратов при переходе с обработки одного вида рыбы на другой необходимо также рассчитывать продолжительность обработки до кулинарной готовности рыбы для того, чтобы обеспечить оптимальные условия ведения технологического процесса. Поэтому является актуальной разработка методики расчета изменения среднеобъемной температуры рыбы в зависимости от химического состава, геометрических размеров тела и режимных параметров.

Изменение температуры тела  $t$  взаимосвязано с изменением влажности его в процессе термической обработки. Поэтому изучение процесса нагревания тел при их обезвоживании изучают, как правило, на основе кривой, которую строят в координатах [3]  $t$  и  $\omega$  (рисунок 1).

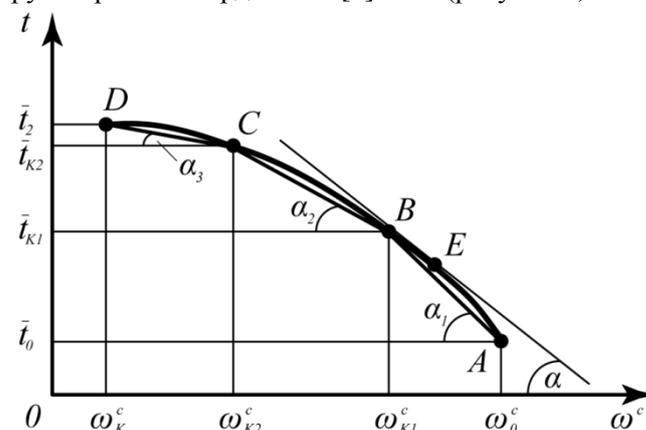


Рисунок 1. Кривая (ABCD) кинетики нагревания рыбы

Кривую ABCD называют также температурной кривой. Тангенс угла наклона касательной к температурной кривой, представленной так, как показано на рисунке 1, в точке E называют температурным коэффициентом и обозначают  $b$  (град / %). Температурный коэффициент характеризует скорость нагрева продукта, следовательно, он должен также зависеть от химического состава тела, его геометрических размеров и режимных параметров.

Представим температурную кривую ABCD ломаной линией, состоящей из трех прямых: АВ; ВС; СД. Тогда температурные коэффициенты прямых можно записать следующим образом:  $b_1 = tg\alpha_1$ ,  $b_2 = tg\alpha_2$ ,  $b_3 = tg\alpha_3$ .

Температурные коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  прямых также будут зависеть от химического состава, геометрических размеров рыбы и режимных параметров, как и коэффициенты  $b$  температурной кривой (рисунок 1).

Кривую ABCD, состоящую из трех прямых, можно описать тремя уравнениями:

$$t_{k1} = t_0 - b_1(\omega_{k1} - \omega_0) \quad (1)$$

$$t_{k2} = t_1 - b_2(\omega_{k2} - \omega_{k1}) \quad (2)$$

$$t_2 = t_{k2} - b_3(\omega_k - \omega_{k2}) \quad (3)$$

здесь  $t_{k1}$ ,  $t_{k2}$ , - температуры продукта, соответствующие первой и второй критическим влажностям  $\omega_{k1}$ ,  $\omega_{k2}$ ;  $t_0$ ,  $t_2$  - начальная и конечная температуры;  $\omega_k$  - конечная влажность продукта.

Здесь и далее влажности  $\omega_0$ ,  $\omega_{k1}$ ,  $\omega_{k2}$  или  $\omega$  рассчитываются в процентах на сухую массу продукта.

Первая критическая  $\omega_{k1}$ , %, и вторая критическая  $\omega_{k2}$ , %, влажности зависят от начальной влажности  $\omega_0$ , %, следующим образом:

$$\omega_{k1} = 1,069\omega_0^{0,969}; \quad (4)$$

$$\omega_{k2} = 0,784\omega_0 + 2. \quad (5)$$

Температурные коэффициенты в процессах обжаривания рыбы погружением в масло могут быть найдены из следующих выражений [4]:

$$b_1 = 0,909 + 0,47(\tau_{k1} - 1,5) + 0,215(\tau_{k1} - 1,5)(\tau_{k1} - 2); \quad (6)$$

$$b_2 = 0,59 + 0,1033(\tau_{k1} - 1,1); \quad (7)$$

$$b_3 = 0,578\tau_{k1}^{-0,678}. \quad (8)$$

Температурные коэффициенты в процессах полугорячего и горячего копчения находят из следующих выражений:

$$b_1 = 2,579 \cdot 0,736^{\tau_{k1}}; \quad (9)$$

$$b_2 = 1,877 \cdot 0,740^{\tau_{k1}}; \quad (10)$$

$$b_3 = 0,095 \cdot \exp\left(\frac{3,447}{\tau_{k1}}\right). \quad (11)$$

В уравнениях (6)-(11):  $\tau_{k1}$  - продолжительность обезвоживания от начальной влажности  $\omega_0$  до первой критической влажности  $\omega_{k1}$ , мин.;  $\tau_{k2}$  - продолжительность обезвоживания от первой критической влажности  $\omega_{k1}$  до второй критической влажности  $\omega_{k2}$ , мин.

Предел применения уравнений (6) - (8):

$$1,1 \text{ мин.} \leq \tau_{k1} \leq 2,5 \text{ мин.}$$

Предел применения уравнений (9) - (11):

$$2,7 \text{ мин.} \leq \tau_{k1} \leq 7,3 \text{ мин.}$$

Продолжительность обезвоживания  $\tau_{k1}$  в первый период (период постоянной скорости обезвоживания) находится из выражения:

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

где  $N$  - скорость обезвоживания в первый период, %/мин.

Для процессов обжаривания рыбы погружением в масло, полугорячего и горячего копчения  $N$  находим из выражений:

а) обжаривание:

$$N = -36,6 + 0,18\omega_0 + 63,5(S/m - 0,171) + 0,67(T_M - 423), \quad (13)$$

где  $\omega_0$  - начальная влажность рыбы на сухую массу, %;  $S/m$  - удельная поверхность рыбы, м<sup>2</sup>/кг;  $T_M$  - температура масла при обжаривании, К.

Пределы применения уравнения (13):

$$230 \leq \omega_0 \leq 430 \%; 0,12 \leq S/m \leq 0,234 \text{ м}^2/\text{кг};$$

$$403 \leq T_M \leq 463 \text{ К};$$

б) полугорячее и горячее копчение:

1) для жирных видов рыб:

$$N = 1,0 + 0,016(\omega_0 - 180) + 24,2(S/m - 0,185) + 0,131(X_p - 30) + 0,350(v - 2,0); \quad (14)$$

2) для рыб средней жирности и тощих:

$$N = 2,9 + 0,016(\omega_0 - 300) + 24,2(S/m - 0,185) + 0,131(X_p - 30) + 0,350(v - 2,0), \quad (15)$$

где  $v$  - скорость сушильного агента, м/с. Остальные значения известны.

Пределы применимости уравнений (14) и (15) для определения  $N$  при обезвоживании жирных видов рыб:

$$180 \leq \omega_0 \leq 300 \%; 0,19 \leq S/m \leq 0,34 \text{ м}^2/\text{кг};$$

$$30,25 \leq X_p \leq 52,50; 2 \leq v \leq 10 \text{ м/с.}$$

Пределы применимости уравнений (14) и (15) для определения  $N$  при обезвоживании рыб средней жирности и тощих:

$$301 \leq \omega_0 \leq 485 \% ; 0,19 \leq S / m \leq 0,34 \text{ м}^2/\text{кг};$$

$$30,25 \leq X_p \leq 52,50 ; 2 \leq v \leq 10 \text{ м/с}.$$

Продолжительность обезвоживания  $\tau_{k2}$  от  $\omega_{k1}$  до  $\omega_{k2}$  при обжаривании находим из следующего выражения [2]:

$$\tau_{k2} = \tau_{k1} \exp \left( \frac{1}{0,098} \left( 0,982 - \frac{\omega_{k2}}{\omega_{k1}} \right) \right). \quad (16)$$

Кривую кинетики обезвоживания в процессах обжаривания можно получить, используя выражение:

$$\tau = \tau_{k1} + \left( \tau_{k1} \cdot \tau_{k2} \exp \left( \frac{1}{b} \left( a - \frac{\omega}{\omega_{k1}} \right) \right) \right)^{0,5}, \quad (17)$$

где  $\omega$  – любое текущее значение влажности, %;  $\tau$  – продолжительность достижения текущего значения влажности.

Кривую кинетики обезвоживания при полугорячем и горячем копчении можно найти из выражения:

$$\tau = \left[ \tau_{k1} \tau_{k2} \cdot \exp \left( 3,97 - 3,88 \left( \frac{\omega}{\omega_{k1}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{k2}} \right)^2 \right) \right]^{0,5}, \quad (18)$$

Продолжительность обезвоживания  $\tau_{k2}$  в процессе горячего и полугорячего копчения от первой критической влажности  $\omega_{k1}$  до второй критической влажности  $\omega_{k2}$  можно получить, используя следующее выражение:

$$\tau_{k2} = \frac{\tau_{k1}}{\exp \left[ 3,97 - 3,88 \left( \omega_{k1} / \omega_{k2} \right)^2 \right]}. \quad (19)$$

Таким образом, представленные выше зависимости позволяют построить кривую кинетики нагрева (рисунок 1), не проводя экспериментов, зная химический состав рыбы, ее удельную поверхность и задаваясь конкретными значениями режимных параметров.

На основе полученных данных по значениям  $t$  и  $\omega$  в точках А, В, С и D можно найти математическое описание температурной кривой, например, используя интерполяционную формулу Лагранжа [2].

Относительная погрешность замены кривой ABCD ломаной линией, состоящей из трех прямых с последующим математическим описанием кривой с помощью интерполяционной формулы Лагранжа не превышает 10 %.

Методика расчета кривых кинетики обезвоживания и нагревания рыбы в процессах обжаривания, полугорячего и горячего копчения:

2.1. Определяют начальную влажность на сухую массу рыбного сырья или задаются ее

значением. Измеряют удельную поверхность рыбы. Затем задаются режимными параметрами.

2.2. По формулам (4), (5) находят критические влажности  $\omega_{k1}$ ,  $\omega_{k2}$ .

2.3. Используя выражения (13), (14), (15) в зависимости от того или иного процесса (обжаривание, полугорячее и горячее копчение), рассчитывают значение  $N$ .

2.4. Затем определяют продолжительность обезвоживания в первый период  $\tau_{k1}$  из выражения (12) и продолжительность обезвоживания  $\tau_{k2}$  от первой критической влажности до второй критической влажности из выражений (16) или (19).

2.5. Рассчитывают температурные коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  из уравнений (6), (7), (8) или (9), (10), (11) в зависимости от того или иного процесса обработки рыбы.

2.6. Используя выражения (17) или (18), определяют зависимость  $\omega = f(\tau)$  и находят конечную влажность  $\omega_k$  продукта и, соответственно, продолжительность всего процесса  $\tau_k$ , на основе потерь влаги согласно технологическим требованиям. Например, потери массы при производстве полуфабриката из обжаренной рыбы для консервов составляют  $x = (14-17) \%$ , а копченого полуфабриката для консервов «Рыбы копченая в масле» -  $x = (20-30) \%$ . Тогда конечная влажность на общую массу будет равна  $\omega_k^o = \frac{\omega_0^o - x}{1 - x/100}, \%$ .

При производстве кулинарных изделий из обжаренной и копченой рыбы кулинарная готовность наступает при температуре в центре рыбы  $t_u = (75-80) \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда среднеобъемная конечная температура рыбы будет равна:

$$t_2 = t_u + \Pi(t_n - t_u),$$

где  $t_n$  - температура на поверхности рыбы;  $\Pi$  – постоянный коэффициент ( $\Pi=1/3$  – для пластины,  $\Pi=1/2$  – для шара,  $\Pi=3/5$  – для шара).

В процессах обжаривания в масле у жирной рыбы  $t_n \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$ , у рыб средней жирности  $t_n \approx 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , у тощих видов рыб  $t_n \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

По среднеобъемной температуре можно рассчитать конечную влажность рыбы из выражения (3):

$$\omega_k = \omega_{k2} - \frac{t_2 - t_{k2}}{b_3}$$

2.7. На основе уравнений (1)-(3) строят температурную кривую  $t = f(\omega)$ , затем, используя зависимость  $\omega = \psi(\tau)$ , находится и зависимость  $t = f(\tau)$ .

Предложенная методика дает возможность расчетным путем строить кривые кинетики нагрева и кинетики обезвоживания в процессах обжаривания, полугорячего и горячего копчения рыбы, что позволяет оптимизировать тот или иной процесс, проекти-

ровать более эффективные с точки зрения расхода сырья и энергии технологии, а также создавать более совершенные аппараты или модернизировать существующее оборудование с учетом взаимосвязи тепловых и массообменных процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Глазунов Ю.Т. и др. Элементы теории «пунктирного» обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15. № 1. С. 15–20.

2 Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А. Моделирование процессов пищевых производств : учеб. пособие для вузов. М.: Колос, 2008. 358 с.

3 Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А., Похольченко В.А. Процессы сушки, копчения, вяления рыбы и их аппаратное оформление. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. 220 с.

4 Артиухова С.А., под ред. Ершова А.М. Технология рыбы и рыбных продуктов : учебник для вузов. М.: Колос, 2010. 1064 с.

#### REFERENCES

1 Glazunov U.T. et al. Elements of the theory of "dotted" in the processes of dehydration and cold-smoked fish drying. *Trudy MGTU «Vestnik MGTU»*. [Proc. of the MSTU «Bulletin of MSTU»], 2012, vol. 15, no. 1, pp. 15-20. (In Russ.).

2 Glazunov U.T., Ershov A.M., Ershov M.A. Modelirovanie protsessov pishchevykh proizvodstv [Modelling of processes of food production]. Moscow, Kolos, 2008. 358 p. (In Russ.).

3 Glazunov U.T., Ershov A.M., Ershov M.A., Pokhol'chenko V.A. Protsessy sushki, kopcheniia, vialeniiia ryby i ikh apparaturnoe oformlenie [Processes of drying, smoking of fish and their hardware design]. Kaliningrad, Izdatel'stvo «KGTU», 2013. 220 p. (In Russ.).

4 Artiukhova S.A., Ershova A.M. Tekhnologiiia ryby i rybnykh produktov [Technology of fish and fish products]. Moscow, Kolos, 2010. 1064 p. (In Russ.).