

УДК 531.3:[664.956+664.951.32]

Методика расчета кривых кинетики и динамики обезвоживания в процессах вяления и холодного копчения рыбы

М.А. Ершов, А.М. Ершов, О.А. Николаенко

Технологический факультет МГТУ, кафедра технологии пищевых производств

Аннотация. В работе представлен обзор расчетных методик построения кривых кинетики и динамики обезвоживания филе рыбы для процессов холодной сушки. Метод позволяет выполнять необходимые расчеты, не проводя экспериментальных работ. Расчет ведется с помощью метода сеток. Для построения сетки используются уравнения обобщенной кривой кинетики обезвоживания, изменения диффузионных свойств рыбы при обезвоживании. Условия на границе раздела двух фаз задаются с помощью зависимости изменения влажности на поверхности филе от среднеобъемной влажности рыбы.

Abstract. The paper provides an overview of computational methods for constructing curves of the kinetics and dynamics of fish fillets' dehydration for cold drying processes. The method allows to perform necessary calculations without conducting experimental work. The calculation is performed using a grid method. To construct the grid the authors have used equations of the generalized curve of kinetics of dehydration, changes in the diffusion fish properties during dehydration. Conditions at the interface of two phases are defined by the variation of moisture on the surface of fillets from the average moisture content of fish.

Ключевые слова: обезвоживание рыбы, холодная сушка, кинетика обезвоживания, динамика обезвоживания, расчетная методика
Key words: fish dehydration, cold drying, kinetics of dehydration, dynamics of dehydration, calculation methods

1. Введение

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение среднего влагосодержания u в зависимости от продолжительности процесса τ . Кривые кинетики обезвоживания рыбы по форме схожи с аналогичными кривыми других пищевых материалов. Рыба при холодной сушке теряет влагу на протяжении всего процесса, причем интенсивность потерь влаги изменяется с течением времени. Количество удаляемой влаги зависит от взаимосвязанного механизма переноса влаги и тепла внутри влажного материала и массо- и теплообмена поверхности тела с окружающей средой. Продолжительность обезвоживания τ зависит от начальной влажности рыбы ω_0 , геометрических размеров (удельной поверхности s/m), температуры t , относительной влажности сушильного агента φ и скорости его движения v . В общем случае можно записать $\tau = f(\omega_0, s/m, t, \varphi, v)$. При выводе эмпирических зависимостей расчета кинетики сушки необходимо учитывать влияние каждого данного фактора.

Динамикой процесса сушки является изменение содержания влаги по толщине материала в зависимости от продолжительности обезвоживания. Изменения распределения влаги по толщине материала в процессе сушки зависят от закономерностей влаго- и теплопереноса внутри рыбы, а также внешнего влаго- и теплообмена с окружающей средой. Расчетное нахождение поля влагосодержания основано на задании соответствующих граничных условий и решении системы дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса.

2. Методика расчета кривых кинетики обезвоживания

При изучении кинетики обезвоживания использовались различные виды рыб, которые отличались размерным и химическим составами. Скорость потока сушильного агента в процессах холодной сушки оказывает влияние на интенсивность обезвоживания только до 2 м/с. Поэтому процесс обезвоживания вели при скоростях сушильного агента 2 м/с или несколько более. Соленость рыбы при холодном копчении является величиной заданной, поэтому ее значения в полуфабрикаты поддерживали в пределах $4,5 \pm 0,5$ %. Таким образом, во всех экспериментах соленость рыбы оказывала примерно одинаковое влияние на процесс обезвоживания. Полученные экспериментальные значения изменения текущих влажностей на сухую массу ω^c в зависимости от времени обезвоживания τ использовались для построения кривых кинетики обезвоживания. Из полученных кривых находили продолжительности обезвоживания τ_{k1} и τ_{k2} , соответствующие критическим влажностям ω_{k1} и ω_{k2} . Далее осуществляли обобщение экспериментальных данных на основе функциональной зависимости:

$$(\omega^c / \omega_{k1}^c) \cdot (\omega^c / \omega_{k2}^c) = f(\tau / \tau_{k1}) \cdot (\tau / \tau_{k2}). \quad (1)$$

В результате представления экспериментальных данных в обобщенных координатах множество зависимостей текущих влажностей от продолжительности обезвоживания $\omega^f=f(\tau)$ объединяются в одну обобщенную кривую кинетики обезвоживания рыбы для процессов холодного копчения и вяления. В обобщенной кривой кинетики обезвоживания максимально учитываются все факторы, влияющие на процесс сушки. В результате математической обработки данной кривой была получена формула для определения текущей влажности рыбы ω^f в зависимости от продолжительности обезвоживания τ .

$$\omega^f = (\omega_{k1} \omega_{k2} \cdot 1,38(1+\tau^2/(\tau_{k1} \tau_{k2}))^{-0,3})^{0,5}. \quad (2)$$

Неизвестные критические влажности ω_{k1}, ω_{k2} зависят от начальной влажности рыбы на сухую массу ω^f_0 и находятся по формулам (Ершов, 1982):

$$\omega_{k1}=1,069 \omega^f_0^{0,969}, \quad (3)$$

$$\omega_{k2}=0,784 \omega^f_0 + 2. \quad (4)$$

Произведение $\tau_{k1} \tau_{k2}$ можно найти, используя формулу (5) для определения продолжительности обезвоживания τ , час (Ершов и др., 2000):

$$\tau = (\tau_{k1} \tau_{k2} \exp(6,84 - 6,30(\omega^f / \omega_{k1}) (\omega^f / \omega_{k2})))^{0,5}. \quad (5)$$

Для этой цели находятся значения влажности $\omega^f_{\tau=6}$, $\omega^f_{\tau=24}$ или $\omega^f_{\tau=48}$ при продолжительности процесса 6, 24 и 48 часов соответственно из следующих выражений:

$$\omega^f_{\tau=6} = \omega^f_0 - Xp^{0,25}(\omega^f_0 - 50)1,158/(1 - 1,591 s/m + 0,848(s/m)^2), \quad (6)$$

$$\omega^f_{\tau=24} = \omega^f_0 - 3,024 Xp^{0,25} (\omega^f_0 - 50)(10s/m - 0,6)^{0,5}, \quad (7)$$

$$\omega^f_{\tau=48} = \omega^f_0 - 3,792 Xp^{0,25}(\omega^f_0 - 50)(10s/m - 0,6)^{0,5}, \quad (8)$$

где $\omega^f_{\tau=24}$ – влажность рыбы на сухую массу (%) при продолжительности процесса обезвоживания 24 часа, %; $\omega^f_{\tau=48}$ – влажность рыбы на сухую массу (%) при продолжительности процесса обезвоживания 48 часов, %; Xp – жесткость режима; ω^f_0 – начальная влажность рыбы на сухую массу, %; ω^f_0 – начальная влажность рыбы на общую массу, %; s/m – удельная поверхность рыбы, м²/кг.

Жесткость режима находится по следующей формуле:

$$Xp = t(1 - \phi/100), \quad (9)$$

где t – средняя температура сушильного агента в коптильной камере, °С; ϕ – средняя относительная влажность сушильного агента в коптильной камере, %.

Формулы (3) и (4) справедливы, если выполняются условия:

$$68 \% \leq \omega^f_0 \leq 78 \%; \quad 0,11 \text{ м}^2/\text{кг} \leq s/m \leq 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}; \quad 5 \leq Xp \leq 22.$$

Формула (6) справедлива при значении $s/m \geq 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$ и для начальной влажности ω^f_0 от 68 % до 78 %. Для удельной поверхности от 0,11 м²/кг до 0,23 м²/кг используются формулы (7) и (8).

Найденные по формулам (6), (7) или (8) значения влажности ω^f и продолжительности обезвоживания τ подставляются в формулу (5) для нахождения произведения $\tau_{k1} \tau_{k2}$.

Данные для построения расчетных кривых кинетики обезвоживания рыбы находят по формуле (2). Для расчета текущей влажности ω^f задаются продолжительностью обезвоживания τ , подставляют значения произведения $\omega_{k1} \omega_{k2}$ и $\tau_{k1} \tau_{k2}$, которые постоянны для всего процесса обезвоживания.

На рис. 1 представлены расчетная и экспериментальная кривые кинетики обезвоживания путассу. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями для данного примера не превысило 10 %.

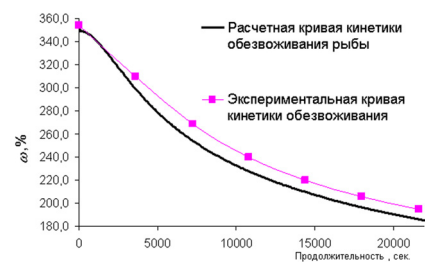


Рис. 1. Кривые кинетики обезвоживания путассу филе

3. Методика расчета кривых динамики обезвоживания

Основными движущими силами массотеплопереноса во влажных телах являются градиенты температуры, влагосодержания, давления. Учитывая, что при холодном копчении и вялении, которое осуществляется при температурах до 40 °С, температурный градиент и градиент давления невелики, то влиянием термовлагопроводности и фильтрационного переноса на процесс можно пренебречь.

Тогда дифференциальное уравнение для переноса влаги в рыбе для процессов холодной сушки можно записать в виде:

$$\partial u/\partial \tau = \partial/\partial x(a_m \partial u/\partial x), \quad (10)$$

где u – влагосодержание объекта обезвоживания, кг вл./кг с.в.; τ – текущая продолжительность процесса, с; a_m – коэффициент теплопроводности влагопереноса m^2/c ; x – пространственная координата, м.

Решение уравнения (10) возможно, если будут известны условия однозначности. Условие распределения влаги по толщине продукта в начальный момент времени:

$$U_{(x;0)} = U_0, \quad U_{(x=0)} = f(U_0)U_0, \quad (11)$$

где U_0 – начальное влагосодержание рыбы, кг вл./кг с.в.; U – среднее по толщине влагосодержание рыбы.

Задачу можно рассматривать симметричной, тогда поток влаги в центре тела будет равен нулю:

$$(\partial u / \partial x)_{(0;\tau)} = 0, \quad (12)$$

где $(\partial u / \partial x)$ – градиент влажности.

Для решения уравнения (10) необходимо определить закономерности взаимодействия тела с окружающей средой, то есть нужно знать изменение влажности на поверхности U_n тела для всего процесса обезвоживания. Поиск данных закономерностей, используя внешний перенос влаги, затруднен влиянием пограничного слоя и сложностью экспериментальных работ. Однако для этой цели можно рассмотреть внутренний перенос влаги, т.к. количество влаги, переместившееся изнутри рыбы к ее поверхности, равно количеству влаги, переместившейся с поверхности рыбы в окружающую среду. По нашему мнению, целесообразно вести поиск вышеуказанных закономерностей, используя кривую кинетики, т.к. в этом случае максимально учитываются все факторы, влияющие на процесс обезвоживания, тогда $U_n = f[U_{(R,\tau)}, U_0]$.

В работах ученых Мурманского государственного технического университета представлена методика нахождения зависимости изменения влажности на поверхности рыбы ω_n от продолжительности процесса обезвоживания $\omega_n = f(\tau)$ (Ершов и др., 2006), при этом установлена функциональная связь между влажностью на поверхности, текущей и начальной влажностями рыбы $\omega_n = f(\omega, \omega_0)$. Зависимость $\omega = f(\tau)$ находится из выражения (2) или (5). Таким образом, в качестве закона взаимодействия поверхности тела с окружающей средой использовались полученные закономерности изменения влаги на поверхности рыбы в течение процесса обезвоживания в зависимости от среднеобъемной влажности. При задании начальных условий учитывалась неравномерность распределения влаги в начальный момент времени.

При решении уравнения (10) необходимо знать диффузионные свойства материала. В выражении (10) эти свойства учитываются коэффициентом теплопроводности влагопереноса (диффузии влаги) a_m . Задача упрощается, если коэффициенты диффузии влаги постоянны в течение всего процесса. При непостоянных коэффициентах диффузии влаги в процессе обезвоживания необходимо знать закономерности изменения диффузионных свойств материалов.

В процессах вяления и холодного копчения коэффициенты диффузии влаги не постоянны. Установлена взаимосвязь между изменением влажности в рыбе и изменением коэффициентов диффузии влаги на основе следующей зависимости:

$$(\omega / \omega_{\kappa 1}) \cdot (\omega / \omega_{\kappa 2}) = f(a_m / a_{m\kappa 1}) \cdot (a_m / a_{m\kappa 2}), \quad (13)$$

где $a_m, a_{m\kappa 1}, a_{m\kappa 2}$ – коэффициенты диффузии (m^2/c), соответствующие текущей ω , первой $\omega_{\kappa 1}$ и второй $\omega_{\kappa 2}$ критическим влажностям на сухую массу соответственно.

С помощью полученной зависимости определяются коэффициенты теплопроводности массопереноса влаги в рыбе по одному экспериментальному значению. В математическом виде зависимость представлена выражением (Ершов, 2007):

$$a_m = \{a_{m\kappa 1} a_{m\kappa 2} \exp[-6,36 + 6,32(\omega / \omega_{\kappa 1})(\omega / \omega_{\kappa 2})]\}^{0,5}. \quad (14)$$

Использование в расчетах зависимости (14) предусматривает экспериментальное определение хотя бы одного коэффициента диффузии влаги в рыбе, чтобы найти произведение $a_{m\kappa 1} a_{m\kappa 2}$. Если найти значение a_m из эксперимента или расчетным путем, то можно, используя выражение (14), определить функции $a_m = f(\omega)$ и $a_m = f(\tau)$. Искомое значение коэффициента теплопроводности массопереноса может быть рассчитано по формуле В.Д. Ермоленко (1962):

$$a_m = \frac{\partial u}{\partial \tau} \left\{ \frac{R^2 - r^2}{6(u_{1(\tau)} - u_{2(\tau)})} \right\}, \quad (15)$$

где $\partial u / \partial \tau$ – мгновенная скорость сушки образца; R и r – половина толщины всего образца и среднего его слоя, $r = R/3$; $u_{2(\tau)}$ и $u_{1(\tau)}$ – среднее влагосодержание образца и среднего его слоя.

Мгновенная скорость сушки $\partial u / \partial \tau$ и среднее влагосодержание образца $u_{2(\tau)}$ находятся по методике расчета кривых кинетики обезвоживания рыбы. Влагосодержание среднего слоя $u_{1(\tau)}$ рассчитывается по формуле:

$$u_{1(\tau)} = 0,833 \cdot (u_y - u_n) + u_n, \quad (16)$$

где u_y – влагосодержание в центре образца; u_n – влагосодержание на поверхности образца кг вл./кг с.в. Влагосодержание в центре образца u_y можно найти по формуле:

$$u_y = 2 \cdot u_{2(\tau)} - u_n \quad (17)$$

Влагосодержание на поверхности образца u_n находится по методике расчета изменения влажности на поверхности рыбы в зависимости от продолжительности процесса обезвоживания (Ершов и др., 2006).

Построение кривых динамики обезвоживания рыбы возможно с применением численных методов, например, методом сеток. С помощью данного метода по предложенным методикам произведен расчет процесса обезвоживания филе путассу.

На рис. 2 представлены экспериментальная и расчетная кривые изменений коэффициентов диффузии влаги в зависимости от текущей влажности рыбы. Расхождение расчетных значений коэффициентов теплопроводности массопереноса от экспериментальных не превысило 25 %. На рис. 3 изображены экспериментальная и расчетная зависимости динамики сушки филе путассу при продолжительности процесса обезвоживания 2 часа и 5 часов. Расхождение расчетных значений распределения влаги по толщине филе от экспериментальных для 2 часов обезвоживания составило 10 %, а при продолжительности обезвоживания 5 часов не превысило 28 %.

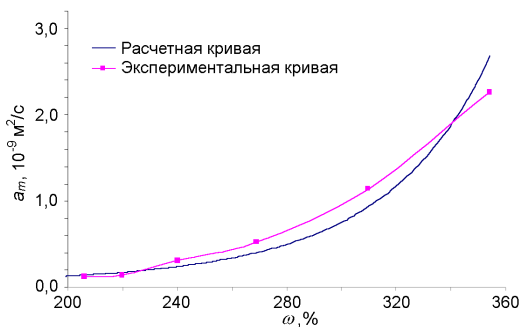


Рис. 2. Кривые изменения коэффициентов диффузии влаги в зависимости от текущей влажности

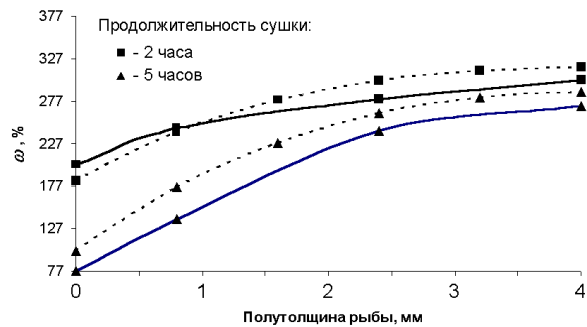


Рис. 3. Кривые динамики обезвоживания путассу. Сплошная линия – эксперимент, пунктир – расчетная кривая

4. Заключение

Методика расчета кривых кинетики обезвоживания позволяет строить данные кривые, не проводя экспериментов, определять продолжительность процессов обезвоживания при копчении, сушке и вялении рыб различной геометрической формы и видового состава.

Методика расчета динамики обезвоживания дает возможность проследить изменение среднеобъемной влажности в зависимости от времени обезвоживания, изменение влагосодержания на границе продукта и в толще филе, изменение коэффициентов теплопроводности в зависимости от среднеобъемной влажности в течение всего процесса обезвоживания.

Литература

- Ермоленко В.Д. Новый метод определения коэффициента диффузии во влажных материалах. *Инженерно-физический журнал*, т.5, № 1, с.70-72, 1962.
- Ершов А.М. Исследование тепло- и массообмена при обжаривании рыбы в растительном масле и с использованием инфракрасного излучения. *Дисс. ...канд. техн. наук. М., МТИПП*, 205 с., 1982.
- Ершов А.М., Ершов М.А., Гроховский В.А. Совершенствование обобщенной кривой кинетики обезвоживания. *Мат. научно-техн. конф. "Техника и технология пищевых производств на рубеже 21 века"*. Мурманск, с.39-41, 2000.
- Ершов М.А. Совершенствование методов расчета обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы. *Автореф. дисс. ...канд. техн. наук. Спец. 05.18.12. Мурманск, МГТУ*, 23 с., 2007.
- Ершов М.А., Ершов А.М., Николаенко О.А. Расчетный метод определения влажности на поверхности рыбы в процессах обезвоживания. *Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета*, т.9, № 4, с.707-709, 2006.