

УДК 664.951

Моделирование изменений диффузионных свойств рыбы при обезвоживании

М.А. Ершов, А.М. Ершов

Технологический факультет МГТУ, кафедра технологий пищевых производств

Аннотация. Методика расчета процессов обезвоживания основывается на полученных обобщенных закономерностях тепло- и массопереноса при холодном копчении и вялении рыбы. 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 рыбы от среднеобъемной влажности рыбы. Методика позволяет без экспериментальных работ находить коэффициенты диффузии влаги при обезвоживании филе рыбы с различной начальной влажностью и для разных режимных параметров.

Abstract. Calculations of dehydration processes are based on the obtained generalized patterns of heat and mass transfer during cold smoking and drying of fish. The calculation is performed using a grid method. For constructing the grid the authors have used equations of the generalized curve of dehydration kinetics, changes in the diffusion properties of fish during dehydration. Conditions at the interface of two phases have been defined by the variation of moisture on the surface of fillets from the average moisture content of fish. The method allows perform the necessary calculations without conducting experimental work.

Ключевые слова: обезвоживание рыбы, коэффициент диффузии влаги, кривая кинетики
Key words: dehydration of fish, moisture diffusion coefficient, kinetics curve

1. Введение

Рыба при холодной сушке теряет влагу на протяжении всего процесса. Графически изменения влажности рыбы в течение процесса обезвоживания представляются кривыми кинетики. 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, тем не менее, имеются и некоторые отличия. С течением времени уменьшается интенсивность потерь влаги при постоянных режимных параметрах процесса сушки. На кривых кинетики сушки можно выделить критические точки K_1 и K_2 , соответствующие первой ω_{k1} и второй ω_{k2} критическим влажностям. Критические точки возникают при завершении удаления влаги с меньшей энергией связи и началом удаления влаги, связанной более сильно. Особенность кривых кинетики сушки рыбы – возникновение критической точки K_2 при удалении микрокапиллярной влаги (Глазунов и др., 2008). В процессе обезвоживания рыбы происходит сужение микрокапилляров и, соответственно, увеличивается энергия связи влаги с материалом. При достижении критической точки K_2 энергия связи влаги существенно возрастает. Процесс сушки после точки K_2 значительно замедляется.

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 . Влияние режимных параметров (температура, относительная влажность) сушильного агента на продолжительность сушки можно учитывать через безразмерный параметр – жесткость режима: $X_p = t(1 - \varphi/100)$. При сушке рыбы скорость движения сушильного агента выше 2 м/с не оказывает какого-либо значительного влияния на интенсивность процесса обезвоживания (Глазунов и др., 2008). В этом случае можно записать: $\tau = f(\omega_0, s/m, X_p)$.

При обезвоживании происходит изменение диффузионных свойств рыбы по причине усадки тканей по мере сушки. Диффузионные свойства учитываются коэффициентом потенциалопроводности влагопереноса (диффузии влаги) a_m . Коэффициенты диффузии влаги непостоянны в течение всего процесса. По мере обезвоживания они уменьшаются. Существует зависимость между коэффициентом диффузии влаги a_m и текущей влажностью рыбы $a_m = f(\omega)$. Установлена взаимосвязь между отношениями ω / ω_{k1} , ω / ω_{k2} и a / a_{mk1} , a / a_{mk2} . Отсюда следует, что

коэффициенты диффузии влаги будут зависеть от химического состава сырья, режимных параметров и, вероятно, от геометрических размеров тела.

Поэтому изучение закономерностей изменения коэффициентов диффузии влаги в рыбе в зависимости от режимных параметров сушильного агента, геометрических размеров и начальной влажности рыбы является актуальной задачей. Изменяя один из факторов, а остальные поддерживая постоянными, можно оценить степень влияния на величину коэффициента диффузии каждого из них. Экспериментальное нахождение данных зависимостей сдерживается трудоемкостью работ и сложностью подбора образцов с одинаковыми параметрами для исследования. Разработана методика расчета коэффициентов теплопроводности массопереноса с помощью численных методов (Ершов, 2007; Ершов и др., 2010). Методика позволяет без экспериментальных работ находить коэффициенты диффузии влаги при обезвоживании филе рыбы с различной начальной влажностью и для разных режимных параметров.

2. Влияние на изменения величины a_m начальной влажности рыбы ω_0

На рис. 1 представлены кривые кинетики обезвоживания рыбы для различной начальной влажности ω_0 при $X_p = 12$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$. С увеличением начальной влажности рыбы при постоянных удельной поверхности и жесткости режима продолжительность процесса сушки увеличивается. На рис. 2 изображены зависимости коэффициентов теплопроводности массопереноса от текущей влажности рыбы. На данных кривых отмечены начало процесса (точки K_0) и критические точки K_1 и K_2 . Точка K_1 возникает на кривых сушки в момент окончания первого периода обезвоживания, который характеризуется постоянной скоростью сушки. Точка K_2 возникает на кривых сушки, когда микрокапилляры мяса рыбы значительно сужаются (Глазунов и др., 2008), при этом возрастает энергия связи влаги с материалом, а скорость сушки существенно замедляется. Наблюдается различный характер кривых, характеризующих изменения коэффициентов диффузии влаги в зависимости от текущей влажности рыбы. Уменьшение коэффициентов диффузии по мере обезвоживания происходит менее интенсивно для рыбы с высоким содержанием начальной влаги. В начале процесса для рыбы с большей начальной влажностью коэффициенты диффузии влаги в точках K_0 (рис. 2) имеют более низкие значения, чем таковые при обезвоживании рыбы с меньшей начальной влажностью.

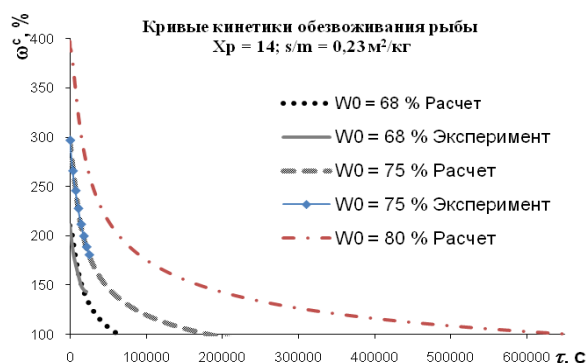


Рис. 1. Зависимости $\tau = f(\omega^s)$ для различной начальной влажности ω_0 при $X_p = 12$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$

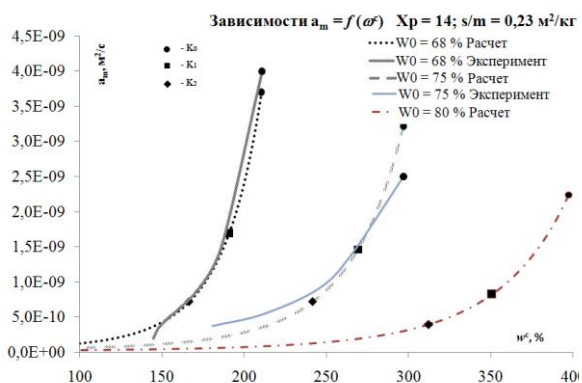


Рис. 2. Зависимости $a_m = f(\omega^s)$ для различной начальной влажности ω_0 при $X_p = 12$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$

Это можно объяснить тем, что, вероятно, размеры большей части пор и капилляров у рыб с повышенной начальной влажностью меньше, чем таковые у рыб с меньшей начальной влажностью.

3. Влияние на величину коэффициента диффузии влаги a_m жесткости режима X_p

На рис. 3 представлены кривые кинетики обезвоживания филе сардинеллы для различной жесткости режима при $\omega_0^0 = 67,8 \%$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$. При повышении жесткости режима происходит интенсификация процесса обезвоживания. Кривая кинетики при жесткости режима $X_p = 27$ (рис. 3) имеет самый высокий темп обезвоживания по сравнению с режимами при X_p равном 8 и 14.

Для достоверной оценки функций $\omega^s = f(\tau)$ и $a_m = f(\omega^s)$, полученных расчетным путем, аналогичные зависимости были найдены на основе экспериментальных данных при жесткости режима $X_p = 14$. Очевидно, что кривые, построенные расчетным путем и на основе данных эксперимента,

практически совпадают (рис. 3 и 4). Это подтверждает адекватность разработанного расчетного способа для построения кривых обезвоживания и нахождения коэффициентов диффузии влаги с использованием численных методов.

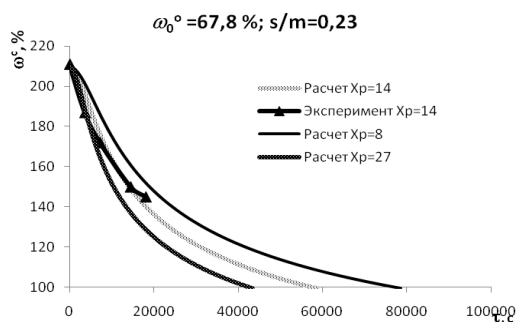


Рис. 3. Зависимости $\omega^c = f(\tau)$ филе сардинеллы для различной жесткости режима при $\omega_0^0 = 67,8 \%$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$

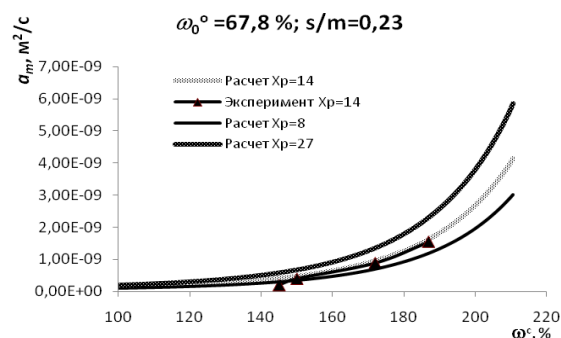


Рис. 4. Зависимости $a_m = f(\omega^c)$ филе сардинеллы для различной жесткости режима при $\omega_0^0 = 67,8 \%$, $s/m = 0,23 \text{ м}^2/\text{кг}$

На рис. 4 изображены зависимости коэффициентов потенциалопроводности массопереноса от текущей влажности рыбы при различных жесткостях режима. Зависимость $a_m = f(\omega)$, построенная для процесса обезвоживания при $X_p = 27$, имеет более высокие значения коэффициентов диффузии влаги по сравнению с кривыми при $X_p = 14$ и $X_p = 8$.

Увеличение коэффициентов диффузии влаги при больших жесткостях режима, вероятно, можно объяснить следующим. При больших жесткостях режима температура высушиваемого материала выше, поэтому возрастает "броуновское" движение молекул воды в капиллярах. Следовательно, и коэффициенты диффузии влаги должны быть выше. На увеличение коэффициентов потенциалопроводности массопереноса влаги с возрастанием температуры материала указывалось в работах А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, В.П. Дубровского и др.

4. Влияние на величину коэффициента диффузии влаги a_m удельной поверхности s/m

На рис. 5 представлены кривые кинетики обезвоживания филе путассу для различной удельной поверхности s/m при $\omega_0^0 = 67,8 \%$, $X_p = 27$.

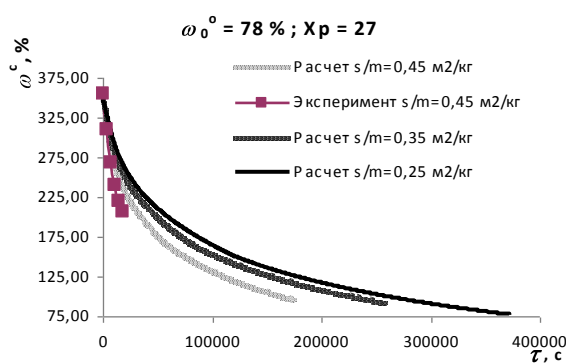


Рис. 5. Зависимости $\tau = f(\omega^c)$ филе путассу для различной удельной поверхности при $\omega_0^0 = 78 \%$, $X_p = 27$

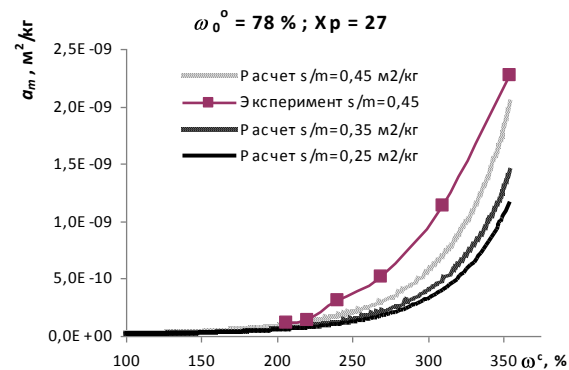


Рис. 6. Зависимости $a_m = f(\omega^c)$ филе путассу для различной удельной поверхности при $\omega_0^0 = 78 \%$, $X_p = 27$

Естественно, чем больше поверхность для массообмена, тем интенсивнее идет обезвоживание рыбы. Поэтому кривая кинетики при $s/m = 0,45 \text{ м}^2/\text{кг}$ (рис. 5) имеет самый высокий темп обезвоживания по сравнению с таковым для удельных поверхностей $s/m = 0,25 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $s/m = 0,35 \text{ м}^2/\text{кг}$.

На рис. 6 изображены зависимости коэффициентов потенциалопроводности массопереноса от текущей влажности рыбы для различной удельной поверхности филе путассу. Зависимость $a_m = f(\omega)$, построенная для филе путассу с удельной поверхностью $s/m = 0,45 \text{ м}^2/\text{кг}$, имеет более высокие значения

коэффициентов диффузии влаги по сравнению с образцами с удельной поверхностью $s/m = 0,35 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $s/m = 0,25 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Некоторое увеличение значений коэффициентов диффузии влаги для рыб с большей удельной поверхностью, на наш взгляд, можно объяснить следующим. У образцов рыб с большей удельной поверхностью полутолщина или радиус (для объектов, по своей форме приближающихся к цилиндру) меньше, чем у образцов с меньшей удельной поверхностью. Поэтому молекула воды при ее перемещении от центра к поверхности преодолевает меньшее сопротивление. Отсюда, вероятно, несколько большие значения коэффициентов диффузии влаги для образцов с более развитой удельной поверхностью при прочих равных условиях.

5. Заключение

Разработанная методика расчета коэффициентов диффузии влаги в рыбе при обезвоживании применима для процессов холодного копчения и вяления. Методика позволяет, не проводя экспериментальных работ, находить закономерности изменений диффузионных свойств рыбы при обезвоживании в зависимости от режимных параметров сушильного агента, геометрических размеров и начальной влажности рыбы. Имеется перспектива использования данного метода при проектировании энергоэффективных режимов обезвоживания рыбы.

Литература

- Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А.** Моделирование процессов пищевых производств. М., Колос, 360 с., 2008.
- Ершов М.А., Ершов А.М., Николаенко О.А.** Методика расчета кривых кинетики и динамики обезвоживания в процессах вяления и холодного копчения рыбы. *Вестник МГТУ*, т.13, № 4/2, с.947-950, 2010.
- Ершов М.А.** Совершенствование методов расчета обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, МГТУ*, 23 с., 2007.