

УДК 664.951

Элементы теории "пунктирного" обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы

Ю.Т. Глазунов¹, А.М. Ершов¹, М.А. Ершов¹, И.Ю. Селяков²,
В.А. Аминов²

¹ Технологический факультет МГТУ, кафедра технологий пищевых производств

² Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматике и вычислительной техники

Аннотация. Создана теория "пунктирного" обезвоживания рыбы в процессе холодного копчения с учётом нелинейных свойств материала. Данная технология имеет прерывистый характер реализации, связанный с последовательностью протекания циклов, состоящих из сушки и релаксации материала. Применение новой технологии позволяет снизить затраты электроэнергии на производство вяленой и копченой продукции на 8-12 % по сравнению с традиционной технологией.

Abstract. The theory of "dotted" fish dehydration in cold smoking with the nonlinear material properties has been created. This technology has the intermittent nature of implementation associated with the occurrence of a sequence of cycles consisting of drying and relaxation of the material. Application of the new technology reduces the cost of electricity for production of dried and smoked products by 8-12 % compared to conventional technology.

Ключевые слова: обезвоживание рыбы, скорость обезвоживания, коэффициент диффузии влаги, градиент влагосодержания
Key words: dehydration of fish, rate of dehydration, moisture diffusion coefficient, gradient of moisture content

1. Введение

Процесс холодного копчения рыбы складывается из трёх основных составляющих: обезвоживания материала, проникновения в тело рыбы копильных веществ и незначительных температурных изменений, связанных с нагреванием полуфабриката до температуры 300-313 К. Известно, что основным фактором, определяющим время холодного копчения, является обезвоживание рыбы. Именно внутреннее распределение влаги влияет на все проводящие свойства продукта и лимитирует общее время обезвоживания в процессах вяления, сушки и холодного копчения рыбы. Поэтому, стремясь оптимизировать технологические характеристики данных процессов (например, минимизировать время процесса, снизить затраты энергоресурсов или рабочей среды), необходимо прежде всего найти и обосновать наилучшие способы обезвоживания материала.

Актуальность темы обусловлена необходимостью рационального использования топливно-энергетических ресурсов. Указанное направление акцентировано на правительственном уровне в государственной программе энергосбережения и повышения энергетической эффективности РФ на период до 2020 г. В рыбоперерабатывающей отрасли в настоящее время востребованы новые технологии, позволяющие расширить ассортимент и повысить рентабельность продукции с улучшенными вкусовыми качествами, к числу которой относятся вяленая и копченая рыба.

2. Физические предпосылки создания технологии "пунктирного" обезвоживания рыбы

Рыба при холодной сушке теряет влагу на протяжении всего процесса. Причем интенсивность потерь влаги изменяется с течением времени. Количество удаляемой влаги зависит от механизма переноса влаги и тепла внутри влажного материала и массо- и теплообмена поверхности тела с окружающей средой. Задача настоящей работы состоит в разработке предпосылок для создания технологии, позволяющей интенсифицировать процесс обезвоживания в период падающей скорости сушки.

Пусть продукт размещается в копильной камере традиционным дискретным способом. Каждый его элемент находится на некотором расстоянии от других элементов и омывается со всех сторон теплоносителем. Одинаковые условия массообмена на поверхности всех единиц продукта позволяют рассмотреть произвольную из них, обобщая получаемые результаты на всю закладку.

Поскольку кривизна боковых поверхностей многих видов рыб, подвергающихся обработке копчением, невелика, а их длина много больше толщины, процесс диффузии влаги в рыбе можно в первом приближении рассматривать протекающим так же, как в неограниченной пластине. Обозначим через $\mathcal{G}(x, \tau)$ влагосодержание рыбы (кг влаги/кг абсолютно сухого вещества). Здесь x и τ – пространственная координата и время. Будем считать, что начало координат совмещено с плоскостью симметрии рыбы. Пусть толщина пластины равна $2R$. Принимая на боковых поверхностях рыбы одинаковые граничные условия, а начальные условия постоянными, мы приведём задачу диффузии влаги к симметричной форме.

В работах по обезвоживанию рыбы в процессе холодного копчения коэффициент теплопроводности внутреннего переноса обычно принимают постоянным. Эксперименты, однако, показывают, что это не соответствует действительности. В диапазоне изменения обезвоживания рыбы, отвечающего процессу её холодного копчения, этот коэффициент изменяется в 10-15 раз (Глазунов и др., 2008). Не учитывать этот факт при исследовании обезвоживания нельзя. При этом коэффициент теплопроводности влагопереноса a хорошо аппроксимируется параболической зависимостью от влагосодержания вида:

$$a(\mathcal{G}) = a_0 + a_1 \mathcal{G} + a_2 \mathcal{G}^2. \quad (1)$$

В таблице представлены значения входящих в выражение (1) переменных, вычисленные для некоторых видов рыб.

Таблица. Значения постоянных величин, входящих в выражение (1), аппроксимирующее коэффициент a ($\text{м}^2/\text{с}$) для различных видов рыб

Вид рыбы	$a_0 \cdot 10^9$	$a_1 \cdot 10^9$	$a_2 \cdot 10^9$
Треска	1,515	-1,675	0,5881
Скумбрия	1,485	-1,721	0,6139
Ставрида	1,632	-1,587	0,5776

Например, для скумбрии выражение (1) в числовой форме записывается как

$$10^9 a = 1,485 - 1,721 \mathcal{G} + 0,6139 \mathcal{G}^2. \quad (2)$$

Примем далее следующие обозначения. Пусть \mathcal{G}_0 – начальное влагосодержание материала, а \mathcal{G}_k – требуемое технологией конечное его значение, отвечающее завершению процесса обезвоживания. Это могут быть, например, следующие величины: $\mathcal{G}_0 = 2,7$ кг/кг, $\mathcal{G}_k = 0,3$ кг/кг. Через \mathcal{G}_n мы обозначаем влагосодержание на поверхности продукта.

Аппроксимация коэффициента диффузии a выявляет, что с уменьшением влагосодержания рыбы её влагопроводные свойства резко ухудшаются. Особенности этого феномена подробно рассмотрено нами в работе (Глазунов, Erszow, 2010). Здесь мы только напомним, что, будучи коллоидным и деформируемым капиллярно-пористым материалом, тело рыбы освобождается от влаги согласно законам капиллярно-пористых сред. Это означает, что вначале с постоянной и наиболее высокой скоростью продукт покидает влага макро- и мезокапилляров, расположенных в приповерхностной области рыбы. В результате этого вблизи поверхности появляется зона толщиной δ (рис. 1), свободная от подавляющей массы влаги, а следовательно, имеющая низкие диффузионные свойства. Кроме того, деформация твёрдого скелета вещества "схлопывает" макро- и мезокапилляры или превращает их в микрокапилляры, что значительно затрудняет дальнейший влагоперенос и препятствует удалению оставшейся внутри материала влаги.

За счёт градиента внутреннего влагосодержания капилляры, расположенные в этой зоне, должны заполняться влагой, наплывающей изнутри. Она поступает из тех областей продукта, которые в меньшей мере подверглись процессу осушения. В наших обозначениях это область, отвечающая значениям пространственной координаты в границах $0 \leq x < R - \delta$. Однако немедленному насыщению области δ препятствуют внутреннее трение самой движущейся по капиллярам жидкости, а также трение её о внутреннюю поверхность капиллярно-пористого скелета вещества.

В это же время внутри обезвоженной части вступают в действие коллоидные свойства продукта. Склеивая освободившиеся от жидкости капилляры, силы деформации закрывают для внутренней влаги единственно возможную дорогу к поверхности. Это и приводит к появлению вблизи поверхности, находящейся в коптильной камере рыбы, зоны со слабыми массопроводными свойствами. В обезвоженных поверхностных слоях, влажность которых становится со временем меньше 150 %,

влажностепроводность может быть на порядок меньше, чем в тот же момент времени, например, в середине продукта.

Очевидно, что пока существует δ -зона, обезвоживание продукта остается малоэффективным: вблизи поверхности рыбы образовался своеобразный внутренний "панцирь", препятствующий эффективному удалению влаги. Ликвидация возникшего препятствия, т.е. заполнение капилляров δ -зоны, оставшейся внутри материала, влагой позволит вернуть их в ранг макро- и мезокапилляров и вновь перевести обезвоживание в фазу активного массообмена.

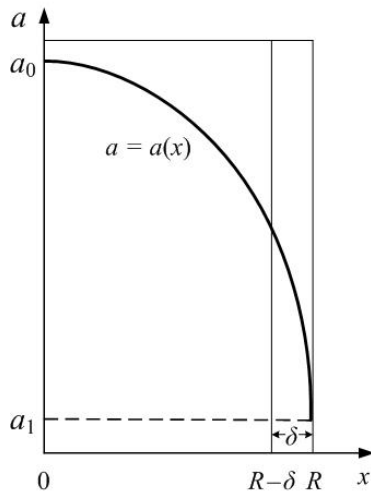


Рис. 1. Кривая зависимости коэффициента влаготепроводности материала a от пространственной координаты, характеризующая процесс обезвоживания рыбы: $a_0 = a(\tau_0)$ – значение коэффициента влаготепроводности, отвечающее исходному насыщению материала влагой; $a_0 = a(\tau_k)$ значение коэффициента влаготепроводности, соответствующее конечному влаготепосодержанию материала; δ – толщина частично обезвоженной зоны

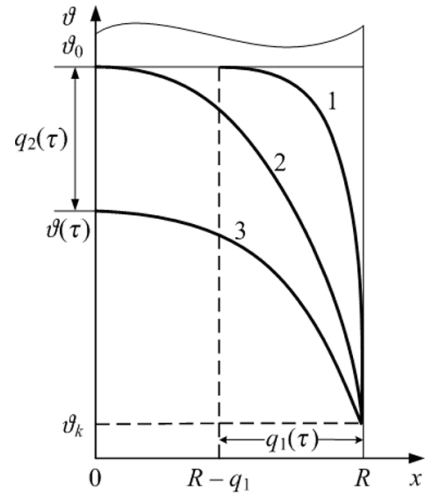


Рис. 2. Кривые, характеризующие распределение влаготепосодержания материала в нестационарной (1) и квазистационарной (2) фазе переноса: $q_1(\tau)$ – толщина возмущенной зоны; $q_2(\tau)$ – глубина изменения положения максимума кривой влаготепосодержания в ходе развития квазистационарного процесса. Кривая 3 показывает распределение влаготепосодержания в момент перехода от нестационарной к квазистационарной фазе переноса

3. Сущность "пунктирного" обезвоживания

Идея практической реализации такого способа обезвоживания состоит в следующем.

Традиционная технология копчения рыбы предполагает одноразовую для всего обезвоживания "установку" условий на поверхности рыбы в форме

$$\mathcal{D}_n = \mathcal{D}_k. \quad (3)$$

Это означает непрерывное обезвоживание материала в границах изменения влаготепосодержания от начальной величины \mathcal{D}_0 до конечного значения \mathcal{D}_k (рис. 2). При этом весь процесс обезвоживания естественным образом распадается на две последовательно протекающие стадии: стадию нестационарного массопереноса и стадию квазистационарного переноса. Нестационарная стадия начинается немедленно после "включения" граничного условия (3) и длится до момента τ' достижения обезвоженной зоной передней плоскости продукта. Приповерхностная зона со слабыми проводящими свойствами и всеми негативными последствиями для внутреннего движения влаги формируется именно в этой фазе переноса. На рис. 2 кривая 1 относится к нестационарной фазе переноса, а кривая 2 отвечает моменту её завершения и переходу к фазе квазистационарной.

Фаза квазистационарного переноса начинается от момента τ' и характеризуется тем, что обезвоживание затрагивает всю толщину материала. В результате этого начинается уменьшение влаготепосодержания в центре симметрии продукта (в плоскости $x = 0$). Влаготеперенос в этой фазе осложняется, с одной стороны, длиной пути покидающих материал частичек влаги, с другой – наличием обезвоженной приповерхностной зоны со слабыми проводящими свойствами. Кривая 3 на рис. 2 показывает распределение влаготепосодержания в некоторый момент времени, относящийся к фазе

квазистационарного переноса. Величина занимает здесь некоторое среднее положение между значениями \mathcal{G}_0 и \mathcal{G}_k , опускаясь со временем всё ниже. В результате этого кривая влагосодержания постепенно превращается в прямую, параллельную оси Ox , показанную на рис. 2 пунктиром. Мы будем считать квазистационарную фазу завершённой в момент t' , когда текущее и конечное влагосодержание в плоскости симметрии материала совпадут между собой, т.е. когда $\mathcal{G}(0, t') = \mathcal{G}_k$.

Предлагаемый способ обезвоживания состоит в многократном повторении на промежутке $0 \leq \tau \leq t'$ процессов сушки и релаксации материала. Для этого промежуток влагосодержания $[\mathcal{G}_0, \mathcal{G}_k]$ разбивается на n частей согласно следующему отношению:

$$\mathcal{G}_0 = \mathcal{G}_{n0} < \mathcal{G}_{n1} < \mathcal{G}_{n2} < \dots < \mathcal{G}_{nn} = \mathcal{G}_k. \quad (4)$$

На каждом элементарном отрезке переноса $\Delta \mathcal{G}_i = \mathcal{G}_i - \mathcal{G}_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) происходит обезвоживание и собственная релаксация материала. Для этого влагосодержание на поверхности рыбы опускается от значения $\Delta \mathcal{G}_{i-1}$ до значения $\Delta \mathcal{G}_i$ и поддерживается на этой высоте в течение всей нестационарной и квазистационарной фазы отрезка $\Delta \mathcal{G}_i$. С одной стороны, это значительно сокращает время существования квазистационарной фазы, с другой – и это самое главное – ведёт к релаксации δ -зоны за счёт проникновения в неё внутренней влаги продукта. Появление влаги внутри δ -зоны расклеивает и расширяет капилляры, превращая их снова в макро- и мезакапилляры. На следующем отрезке $\Delta \mathcal{G}_{i+1}$ изменения влагосодержания продукт вновь входит в процесс обезвоживания с высокими проводящими свойствами по всему своему объёму.

Наиболее благоприятны для переноса, однако, первые "отрезки" пунктирного обезвоживания: $\Delta \mathcal{G}_1, \Delta \mathcal{G}_2, \Delta \mathcal{G}_3$. Благодаря высокому влагосодержанию по всему объёму материала процесс протекает здесь в условиях, близких к идеальным.

4. Математическая модель процесса обезвоживания рыбы

При построении математической модели "пунктирного" способа обезвоживания рыбы рассмотрим сначала нелинейную краевую задачу в дифференциальной форме.

Основной движущей силой процесса обезвоживания является градиент влагосодержания. Учитывая, что при холодном копчении рыбы температурный градиент невелик, действием градиента давления, вызванного внутренним парообразованием, можно пренебречь.

Уравнение диффузии влаги тогда может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Здесь a – коэффициент диффузии влаги ($\text{м}^2/\text{с}$).

Наша задача состоит в сравнении общего времени обезвоживания рыбы в условиях непрерывного копчения и "пунктирной" организации процесса. Поэтому вначале краевые условия следует принять в форме, отвечающей непрерывному характеру обезвоживания. В этом случае они имеют следующий вид:

- граничные условия:

$$\mathcal{G}(x, t) \Big|_s = \mathcal{G}_n, \quad \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x}(0, \tau) = 0; \quad (6)$$

- начальные условия:

$$\mathcal{G}(x, 0) = \mathcal{G}_0. \quad (7)$$

Здесь индексы "n" и "0" относятся к поверхности рыбы S и к нулевому моменту времени, отвечающему началу процесса. Условия симметрии и постоянные начальные условия $\mathcal{G}_0 = \text{const}$ вполне естественно описывают рассматриваемый процесс.

Эксперименты показывают, что влагосодержание на поверхности рыбы зависит от времени. Мы будем считать, однако, что имеет место равенство: $\mathcal{G}_n = \text{const}$, что означает постоянство влагосодержания на поверхности рыбы в течение всего времени обезвоживания. Под \mathcal{G}_n мы подразумеваем среднее по времени и эквивалентное переменным по влиянию на продолжительность процесса значение влагосодержания на поверхности. Такое представление краевых условий даст в дальнейшем возможность получить простые расчетные формулы, позволяющие проводить количественный и качественный анализ как непрерывного, так и пунктирного способа обезвоживания.

5. Экспериментальные результаты "пунктирного" обезвоживания

Традиционная технология производства вяленой продукции предусматривает включение в процесс временных интервалов, когда подача теплоносителя в установку прекращается. Это рекомендуется делать для предотвращения пересыхания поверхности объекта обезвоживания. Во время таких выдержек происходит перераспределение влаги внутри продукта. Скорость выравнивания влаги в теле будет определяться как свойствами самого объекта обезвоживания, так и свойствами окружающей его среды. В научной литературе нет достаточных сведений, позволяющих рационально использовать временные интервалы выдержки в процессах холодного копчения, вяления и сушки рыбы. Внедрение пунктирного обезвоживания в производство затруднено из-за отсутствия расчетных методик данного способа обезвоживания и сложности экспериментального поиска оптимальных режимов.

В учебно-экспериментальном цехе МГТУ были проведены работы по выявлению эффективности предлагаемой технологии "пунктирного" обезвоживания. Данная технология апробировалась на универсальной коптильно-сушильной установке (УКСУ). В качестве объектов обезвоживания использовались камбала-ерш, путассу и морской окунь. На рис. 3 представлены кривые кинетики обезвоживания путассу с применением "пунктирного" обезвоживания и при непрерывном процессе. На рис. 4 изображены кривые распределения влаги по толщине путассу с применением "пунктирного" обезвоживания (заключительная фаза перераспределения влаги, $\tau = 44,5$ ч) и для непрерывного обезвоживания ($\tau = 44,5$ ч). Легко заметить хорошее совпадение результатов обезвоживания продукта при использовании старой и новой технологий.

Обезвоживание путассу производили в течение двух суток. Были задействованы два модуля УКСУ с одинаковыми параметрами теплоносителя. В первом модуле размещались образцы, которые подвергались непрерывному обезвоживанию. Во втором модуле находились образцы для "пунктирного" обезвоживания. Объекты сушки имели максимально приближенные размерно-массовые характеристики и находились в равных условиях обезвоживания. Образцы с применением "пунктирного" и непрерывного обезвоживания высушивались с одинаковой скоростью. Однако суммарное время релаксации составило 5,5 ч, то есть при пунктирном обезвоживании наблюдается экономия электроэнергии при одинаковых конечных результатах.

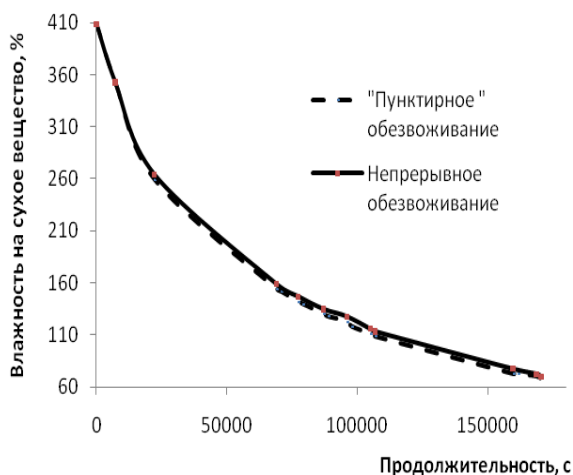


Рис. 3. Кривые кинетики обезвоживания путассу с применением "пунктирного" и непрерывного обезвоживания

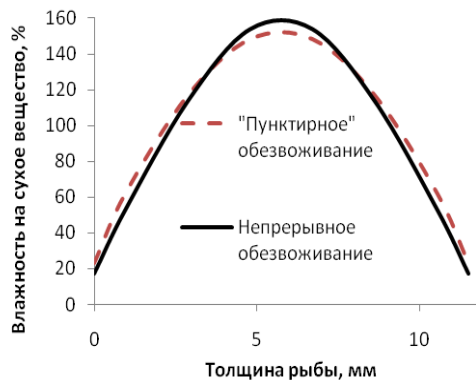


Рис. 4. Кривые распределения влаги по толщине путассу с применением "пунктирного" и непрерывного обезвоживания по прошествии 44,5 ч

Экономия появляется за счёт использования этапов прерывания процесса, в течение которых происходит релаксация продукта. Контрольный анализ конечной влаги в высушенных образцах показал, что при "пунктирном" обезвоживании содержание влаги на сухую массу составило 38,5 %, а при непрерывном обезвоживании – 39,5 %. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что применение "пунктирного" обезвоживания может стать основой при разработке новых энергоэффективных режимов.

Для дальнейшей разработки теории и технологии "пунктирного" обезвоживания необходимо решить следующие задачи.

1. Провести дополнительные эксперименты для подтверждения эффективности выбранной

технологии и целесообразности последующих изысканий.

2. Разработать численный метод исследования нелинейной математической модели процесса обезвоживания с учетом специфики новой технологии и реализовать решение полученной модели.

3. На основе полученных результатов определить рациональные комбинации периодов сушки и релаксации в зависимости от химического состава, геометрических размеров обрабатываемой рыбы и параметров сушильного агента.

4. Создать инженерную методику расчета кинетики и динамики обезвоживания для новой технологии.

Разработка обобщенных математических моделей актуальна для инженерных расчетов процессов копчения и вяления рыбы, поскольку открывает пути к созданию оптимальных режимов обработки продукта, проектированию современного и модернизации существующего коптильно-сушильного оборудования.

6. Заключение

Разрабатываемая технология выпуска вяленой и копченой продукции направлена на повышение энергетической эффективности производства. Эксперименты показывают, что затраты электрической энергии при производстве данных видов продукции снижаются на 8-12 % по сравнению с традиционной технологией. Экономический эффект достигается внесением в традиционную технологию обезвоживания специальных комбинированных режимов сушки и релаксации. Применение данных режимов позволяет модифицировать процесс за счёт рационального использования диффузионных свойств обрабатываемого сырья.

Разрабатываемая технология не требует существенных технических изменений в традиционном технологическом процессе. Поэтому представляется возможным её внедрение на предприятиях рыбоперерабатывающей отрасли, специализирующихся на выпуске вяленой и копченой продукции.

Литература

Głazunow Ju., Erszow A. Modelowanie procesu wędzenia ryb na zimno. Acta Elbingensia. Nauki ekonomiczne (nr 2). Elbląg, Elbląska Uczelnia Humanistyczno – Ekonomiczna, t.IX, s.41-76, 2010.

Глазунов Ю.Т., Ершов А.М., Ершов М.А. Моделирование процессов пищевых производств. М., Колос, 360 с., 2008.