

Постановка задачи тепломассопереноса процесса горячей сушки рыбы.

Д.т.н. Вороненко Б.А., Пеленко В.В., аспирант Стариков В.В.

Как известно [1], горячей сушкой называется способ консервирования, при котором удаление воды из рыбы осуществляется воздухом с высокой температурой (80 - 200°C). Рыба, высушенная таким способом, содержит от 6 до 30% воды.

Существуют два совершенно противоположных мнения относительно выбора температурного режима горячей сушки рыбы [2].

Сторонники медленной сушки рыбы, при температуре 120-140°C, считают, что такой способ исключает подгорание или пересушивание рыбы и придает высокие вкусовые качества продукту; сторонники быстрой сушки рыбы при температуре 160-200°C считают, что такой температурный режим значительно ускоряет процесс сушки и при внимательном ведении процесса также исключает подгорание или пересушивание продукта и придает ему высокие вкусовые качества.

Из опыта работы промышленности следует, что при горячей сушке рыбы необходим комбинированный температурный режим – с высокой температурой сушки в начале процесса и значительным понижением её в конце сушки.

Дегустация сушеной продукции, высушенной в печах различной конструкции, показала, что наилучшими вкусовыми качествами обладала рыба, высушенная в обыкновенной русской печи или печах, работающих по этому принципу [2].

Рассмотрим один из этапов приготовления крупы из крупной рыбы с предварительным её пропеканием или варкой - пропеканием в сушильной печи.

После разделки, мойки и соления в слабом тузлуке при температуре 10-12°C, подсушенные тушки раскладывают на противень и ставят в сушильную печь. Тушки рыбы кладут не прямо на дно противня, а на деревянные рейки, чтобы рыба не прилипала к дну. В печи рыбу пропекают в течение 2,5ч при температуре 150-170°C до тех пор, пока мясо её станет плотным и будет свободно отделяться от позвоночной кости.

Для рассматриваемого этапа характерен молярно-молекулярный высокоинтенсивный тепло- и массоперенос. Поэтому для нахождения полей температуры, влагосодержания и давления внутри капиллярнопористого тела-рыбы – необходимо решить известную систему дифференциальных уравнений совместного тепломассопереноса [3] с учетом соответствующих условий взаимодействия тела (тушки рыбы) с окружающей средой (краевых условий):

$$\partial t / \partial \tau = a q \nabla^2 t + (\epsilon r / c q) \cdot (\partial u / \partial \tau); \quad (1)$$

$$\partial u / \partial \tau = am \nabla^2 u + am \delta \nabla^2 t + arcp \nabla^2 p; \quad (2)$$

$$\partial p / \partial \tau = ar \nabla^2 p - (\varepsilon / cr) \cdot (\partial u / \partial \tau). \quad (3)$$

Обрабатываемый продукт принимаем за тело одной из основных геометрических форм – неограниченную пластину.

Радиационные источники теплоты являются источниками «тёмного» инфракрасного излучения. Под ИК-излучением понимают невидимую глазом область облучения, примыкающую к красной части спектра. В общем спектре электромагнитных колебаний

ИК-лучи занимают сравнительно небольшой участок с длинами волн от 0,76 до 750 мкм [4,5]. Нагрев пищевых продуктов осуществляется следующими видами теплообмена: конвекцией и лучеиспусканием. При этом на первом этапе исследования конвективным теплообменом от окружающего воздуха при составлении математической модели пренебрегаем, причем, чем выше температура источника радиационного инфракрасного излучения, тем обоснованнее эта предпосылка [4].

Лучистый поток через поверхность тела принимаем постоянным. Согласно [6] ошибка от такого допущения не превышает 6%.

Лучистый поток, проникая в продукт, затухает по экспоненциальному закону

$$w = w_p \exp[-k(l-x)], \quad (4)$$

где w – мощность лучистого потока по координате тела; w_p – мощность лучистого потока поглощенного поверхностью тела; k – коэффициент поглощения; l – толщина продукта.

При $l > 10$ мм и высоком значении k лучистый поток w быстро затухает по мере проникновения в продукт [7], и можно считать, что вся энергия отдается поверхности, а в нагреве внутренних слоев не участвует. В этом случае инфракрасный источник теплоты учитывают не в уравнении теплопроводности, описывающем теплообмен внутри тела, а в граничном условии [6].

Для упрощения системы уравнений (1) – (3) примем следующие допущения:

1. ввиду сравнительно медленного изменения влагосодержания u со временем при ИК – нагреве опустим в уравнении (1) член $(\varepsilon r / cr) \cdot (\partial u / \partial \tau)$, а в уравнении (3) – составляющую $(\varepsilon / cr) \cdot (\partial u / \partial \tau)$;
2. на основании многих экспериментальных данных [5] пренебрегаем членом $am \delta \nabla^2 t$ в уравнении (2), т.е. не будем учитывать процесс термодиффузии влаги и изменения влагосодержания.

Таким образом, при ИК – облучении нагрев происходит с поверхности, а внутренним слоям рыбы теплота передается теплопроводностью, влагопроводностью и молярным процессом типа фильтрации под действием градиента нерелаксированного давления.

Принимая теплофизические характеристики обрабатываемого продукта в процессе копчения постоянными, с учетом указанных упрощений опишем

нагрев внутренних слоев рыбы в сушильной печи следующей краевой задачей связанного тепло- и массопереноса:

требуется решить одномерную систему уравнений

$$\partial t(x, \tau) / \partial \tau = aq(\partial^2 t / \partial x^2); \quad (5)$$

$$\partial u(x, \tau) / \partial \tau = am(\partial^2 u / \partial x^2) + arcp(\partial^2 p / \partial x^2); \quad (6)$$

$$\partial p(x, \tau) / \partial \tau = ar(\partial^2 p / \partial x^2) \quad (7)$$

$$(0 < x < 1, \tau > 0)$$

при следующих условиях:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad (8)$$

$$u(x, 0) = u_0 = \text{const}; \quad (9)$$

$$p(x, 0) = 0; \quad (10)$$

$$-\lambda \cdot [\partial t(l, \tau) / \partial x] - r \cdot q_{ж} + q_{и} = 0; \quad (11)$$

$$-am \cdot [\partial u(l, \tau) / \partial x] + am\delta \cdot [\partial t(l, \tau) / \partial x] + \beta[u(l, \tau) - u_p] = 0; \quad (12)$$

$$p(l, \tau) = 0; \quad (13)$$

$$\partial t(0, \tau) / \partial x = \partial u(0, \tau) / \partial x = \partial p(0, \tau) / \partial x = 0; \quad (14)$$

Здесь

(5) – уравнение теплопереноса (теплопроводности);

(6) – уравнение влагопереноса;

(7) – уравнение молярного массопереноса;

(8) – (10) – начальные условия;

(11) – граничное условие второго рода, задающее поток теплоты через поверхность тела;

(12) – граничное условие третьего рода, описывающее влагообмен тела с окружающей средой;

(13) – граничное условие первого рода, отражающее факт выравнивания внутреннего избыточного давления воздуха на выходе его на поверхность материала;

(14) – условие симметрии.

Вывод

1. Предложена физическая и соответствующая упрощенная математическая модель тепловой обработки рыбы в сушильной печи в виде совместного тепломассопереноса внутри тела (рыбы), обусловленного передачей тепла продукту от ИК – источника, нагретого воздуха и стенок печи.
2. Аналитическое решение краевой задачи (5) – (14), определяющее распределения полей температуры и влагосодержания, дает возможность определить темп нагревания, удельный расход энергии для поддержания необходимого режима.
3. После экспериментальной проверки и аналитического исследования с помощью компьютера разработанная математическая модель может быть рекомендована для инженерных расчетов и может послужить основой для оптимизации процесса горячей сушки рыбы.

Обозначения.

$t = t(x, y, z, \tau)$ – температура; $u = u(x, y, z, \tau)$ – влагосодержание; $p = p(x, y, z, \tau)$ – избыточное (нерелаксированное) давление; τ – время; x, y, z – координаты;

aq – коэффициент температуропроводности; ε – коэффициент фазового превращения; r – удельная теплота парообразования; cq – удельная теплоемкость материала; am – коэффициент потенциалопродности влаги; δ – термоградиентный коэффициент; ap – коэффициент молярного переноса; cp – удельная пароемкость среды; $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ – оператор Лапласа; λ – коэффициент теплопроводности; $qж$ – плотность потока влаги, подводимого к зоне испарения поверхности тела; qi – поток лучистой энергии через поверхность тела;

β – коэффициент влагообмена; up – равновесное влагосодержание.

Литература:

1. Касьянов Г.И., Золотокопова С.В. Технология копчения мясных и рыбных продуктов. - Москва – Ростов-на-Дону: изд. центр «Март», 2004 – 208с.
2. Воскресенский Н.А. Технология посола, копчения и сушки рыбы. М.: Пищпромиздат, 1958. – 547с.
3. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло и массопереноса. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535с.
4. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. – М.: пищевая пром-ть, 1966 – 376с.
5. Рогов И.А., Некрутман С.В. СВЧ и ИК-нагрев пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1976 – 210с.
6. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессе сушки. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464с.
7. Гинзбург А.С. Основы теории и техника сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая пром-ть, 1973. – 528с.