

Постановка задачи совместного тепломассопереноса при выпекании картофеля с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты

Д.т.н Б.А. Вороненко, к.т.н. Ю.В. Клоков, аспирант Д.А. Гоппе

Санкт-петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий, факультет пищевой
инженерии и автоматизации, кафедра ТММП,
valdurtera@rambler.ru

Предложена физическая и соответствующая математическая модель тепловой обработки – выпекания – неочищенного картофеля в виде дифференциальных уравнений совместного тепломассопереноса внутри продукта, обусловленного передачей тепла от источника электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Ключевые слова: тепломассоперенос, картофель, выпекание, энергия, электромагнитное поле, сверхвысокая частота, краевая задача.

В соответствии со структурой питания одним из видов углеводосодержащих продуктов питания является картофель выпечной.

Известный процесс выпекания картофеля включает кроме подготовительных операций, в том числе очистку поверхности картофеля от кожуры, воздействие ИК-излучения для получения температуры кулинарной готовности и поверхностной корочки, характерной выпечному картофелю [1].

Одним из эффективных путей интенсификации технологических процессов тепловой обработки пищевых продуктов является использование энергии электромагнитного поля (ЭМП) сверхвысокочастотного диапазона [3-5]. Нагрев в СВЧ-поле позволяет значительно сократить длительность тепловой обработки, повысить качество готовых изделий, при СВЧ-нагреве отсутствуют какие – либо продукты сгорания. СВЧ-поле проникает в обрабатываемый продукт на значительную глубину, что позволяет осуществить его “объемный нагрев” независимо от теплопроводности.

Исходя из общих подходов пищевой технологии авторами разработан способ, включающий интенсивный нагрев картофеля с кожурой СВЧ-энергией, с последующим ИК-нагревом для получения выпечного изделия, что

представляет интерес для медицинских исследований как продукта, имеющего лечебные свойства. Исследуемый объект – картофель с кожурой (оболочкой), источник нагрева – электромагнитное поле СВЧ, источник придания колера – ИК- излучение.

Известны решения задач при СВЧ-нагреве для тел сферической формы, но без внутреннего источника теплоты [2], а также с источником теплоты, но для тел несферической формы объекта [3].

Данная работа является постановочной задачей для математического описания процесса нагрева объекта сферической формы с оболочкой с источником теплоты.

Механизм переноса вещества и энергии в условиях СВЧ-нагрева качественно изменяется. Помимо переноса, обусловленного действием молекулярных сил, большую роль играют явления переноса, связанные с макроскопическими – молярными процессами типа фильтрации. Молярный массоперенос вызывается появлением в материале устойчивого градиента общего давления ∇p [2]. Наложение молярного переноса на молекулярные процессы приводит к перестройке механизма переноса и связанной с ней существенной интенсификации процесса.

На интенсифицирующее действие общего давления, а, возможно, также и переменного электрического поля на внутренний перенос тепла и массы вещества в условиях диэлектрического нагрева пищевых продуктов (капиллярно-пористых тел) в СВЧ-поле указывают значительно большие значения коэффициентов внутреннего переноса в случаях нагрева в СВЧ-поле в сравнении с коэффициентами молекулярного переноса в случаях нагрева в процессах невысокой интенсивности [3].

Все сказанное предполагает использование для исследования и расчета процесса тепловой обработки – выпекания - картофеля в ЭМП СВЧ дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепло – и массопереноса [2, 6].

С учетом особенностей нагрева пищевых продуктов (капиллярно-пористых тел) в СВЧ-поле соответствующая краевая задача заключается в решении указанной системы уравнений для однородного и изотропного тела

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \frac{\varepsilon p}{c_q} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c_q \gamma_0}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t + a_p c_p \nabla^2 p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 p - \frac{\varepsilon}{c_p} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где оператор Лапласа ∇^2 в данном случае выражается в сферических координатах:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r},$$

так как форму картофеля принимаем приближенно за тело основной геометрической формы – сферу.

Уравнение (1) – уравнение внутреннего теплопереноса, уравнения (2) и (3) описывают перенос массы вещества внутри тела.

При СВЧ – нагреве мощность внутреннего источника снижается в зависимости от расстояния от поверхности тела по экспоненциальному закону [3]. В указанной работе получено упрощенное решение для полубесконечного стержня с мощностью внутреннего источника в виде

$$Q_v = Ae^{-kx},$$

где x – текущая координата. С учетом необходимости получения через время τ_k в центре образца конечной температуры t_k , удельную мощность внутреннего источника тепла при электрическом нагреве в нашем случае запишем в виде

$$Q_v = Q_0 e^{-k(R-r) + n \frac{\tau}{\tau_k}}, \quad (4)$$

где $n = \frac{t_k}{t_0}$.

Условия однозначности, соответствующие реальным условиям СВЧ-обработки картофельных клубней для их выпекания и необходимые для решения системы уравнений (1) – (3), будут следующими:

$$t(r, 0) = t_0 = const; \quad (5)$$

$$u(r, 0) = u_0 = const; \quad (6)$$

$$p(r, 0) = t_0 = const; \quad (7)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial r} = \frac{\partial p(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (8)$$

$$t(0, r) < \infty; u(0, r) < \infty; p(0, r) < \infty; \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(R, \tau)}{\partial r} + \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (10)$$

$$p(R, \tau) = p_0 = const; \quad (11)$$

$$t(R, \tau) = t_n = const \quad (12)$$

Равенства (5) – (7) начальные условия; (8) – (9) условия симметрии и физической ограниченности потенциалов переноса. Равенство (11) – граничное условие первого рода, им определяется релаксация избыточного давления на поверхности материала до нормального атмосферного давления.

Граничное условие первого рода – постоянство температуры на поверхности тела – описывается равенством (12).

Следует отметить, что толщиной наружной оболочки картофеля, как значительно меньшей в сравнении с радиусом сферы, пренебрегаем.

Кроме того, как показали авторы работы [3] на основании экспериментальных данных, можно в уравнении (2) пренебречь членом $a_m \delta \nabla^2 t$, т.е. не учитывать процесс термодиффузии влаги и изменение влагосодержания.

Выводы

Предложена физическая и соответствующая математическая модель тепловой обработки – выпекания – неочищенного картофеля в виде дифференциальных уравнений совместного тепломассопереноса внутри продукта, обусловленного передачей тепла от источника электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Аналитическое решение поставленной задачи краевой задачи (1) – (12) позволит получить распределение температуры и влагосодержания в картофеле, т.е. поля температур и влагосодержаний, рассчитать температуру нагрева и энергозатраты, необходимые для доведения продукта до полной готовности.

Полученное решение позволит решать и задачу определения времени термической обработки продукта.

Список литературы

1. Технология продукции общественного питания./ Под ред. Л.Л. Кожина - М.: Мир, Т.1, 2007. - 416с, Т.2, 2007 – 351с.
2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло – и массопереноса. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
3. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. – М.:Пищевая промышленность 1976.–212 с.
4. СВЧ – энергетика, под ред. Э. Окресса, Т.2 «Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности, - М.:Мир, 1971. – 272 с.

5. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 200 с.
6. Лыков А.В. Система дифференциальных уравнений тепло – и массопереноса в капиллярно-пористых телах (Обзор состояния вопроса). [A.V. Luikov, Systems of differential Equations of Heat and Mass Transfer in capillary – porous Bodies (Review). International journal of Heat and Mass Transfer, Volume 18, №1, 1975].

Обозначения

$t(r, \tau) = t$ - температура, К;

$u(r, \tau) = u$ - влагосодержание, кг/кг;

$p(r, \tau) = p$ - избыточное давление, Па;

τ - текущее время, с;

r - текущая координата, м, R – радиус сферы;

a_q - коэффициент температуропроводности, m^2 / c ;

a_m - коэффициент потенциало (влаго -) проводности массопереноса жидкости и пара, m^2 / c ;

ε - коэффициент фазового превращения;

ρ - удельная теплота фазового превращения, Дж/кг;

δ - термоградиентный коэффициент, 1/К;

a_p - коэффициент молярного переноса (коэффициент конвективной диффузии, или коэффициент потенциалопроводности фильтрационного давления паровой смеси), m^2 / c ;

c_p - удельная пароемкость среды, $m^3 / Дж$;

γ_0 - плотность абсолютно сухого вещества продукта (картофеля), $кг / м^3$;

Q_0 - мощность СВЧ – источника, $Дж / м^3$;

k - коэффициент поглощения СВЧ-энергии телом, 1/м;

Q_v - удельная мощность внутреннего источника теплоты, $Вт / м^3$.

A problem of combined heat and mass transfer for potato baked in ultrahigh frequency electromagnetic field

Voronenko B.A., Klokov U.V., Goppe D.A.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering
valdurtera@rambler.ru

A physical and a correlating mathematical model of heat processing (baking) unpeeled potato is proposed as a set of differential equations of combined heat and mass transfer due to a source of ultrahigh frequency electromagnetic field.

Keywords: heat and mass transfer, potato, baking, energy, electromagnetic field, ultrahigh frequency, boundary problem.