

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КОПЧЕНИЯ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

Ульянов Н.И.

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
г. Могилев, Беларусь

Копченые мясные продукты обладают неповторимыми вкусовыми достоинствами, имеют длительный срок хранения, что делает их несравненно привлекательными для домохозяек, как в качестве готового изделия, так и элемента многочисленных кулинарных рецептов.

Копчение мяса – обработка мясoproдуктов пропитыванием коптильными веществами, получаемыми в виде коптильного дыма в результате неполного сгорания древесины. Продукт при копчении претерпевает изменения, связанные не только с воздействием коптильных веществ, но и с температурным режимом и продолжительностью обработки. Мясoproдукты коптят при разном режиме: 18...20°C (запекание в дыму). Для получения дыма используют следующие породы древесины (в порядке убывающей технологической ценности): бук, дуб, береза, тополь, ольха, осина.

Термическая обработка является основным технологическим процессом при производстве копченых мясных изделий. Ее организация существенно влияет на качество, выход, следовательно, и себестоимость готовой продукции. При разработке новых продуктов, их технологии и рецептур, а также при смене оборудования необходимо учитывать происходящие изменения, связанные с тепло- и массопереносом, который адекватно можно исследовать на основе математического моделирования. Существующие для расчета кинетики процесса прогрева колбасного батона аналитические модели учитывают только явление теплопроводности.

Использование уравнений совместного тепло-массопереноса, выведенных академиком А.В. Лыковым для описания нестационарных процессов, протекающих в капиллярно-пористых коллоидных телах, каковыми являются фаршевые мясoproдукты, позволяет учесть влияние разных форм связи и наложение явлений различной физической природы. Актуальным является математическое моделирование процесса копчения колбасных изделий, учитывающее особенности теплоподвода при традиционном копчении и при использовании инфракрасного нагрева. Разработка математических моделей в виде аналитических решений соответствующих задач тепло- и массопереноса, которые дают возможность рассчитывать и прогнозировать температурные и влажностные поля в обрабатываемом продукте, могут явиться основой для оптимизации и интенсификации метода тепловой обработки мясных продуктов.

Колбасные батоны представляют собой твердообразные системы (частицы), содержащие элементы как жидкостных компонентов, в основном животных тканей, так и структуру, полученную при измельчении и смешивании компонентов. Эти частицы неоднородны по величине, структуре и физическим свойствам. Поэтому для описания процессов тепло- и массообмена в продукте следовало бы использовать дифференциальные уравнения для каждой отдельной частицы, что сделать невозможно. Однако размеры частиц и расстояния между ними ничтожно малы по сравнению с размерами массы материала, подвергаемого термообработке в

копильной камере, что дает возможность колбасный батон, представляющий собою дисперсную систему, рассматривать не как совокупность отдельных дискретных частиц, а как сплошную среду, однородную и изотропную.

Основным способом передачи теплоты является конвективный и отчасти радиационный. В этом случае, если считать колбасный батон, подвергаемый тепловой обработке в камере, телом, имеющим форму неограниченного цилиндра, условия взаимодействия которого с окружающей средой выражаются граничными условиями второго рода (включающими экспериментально найденные функциональные зависимости удельных потоков тепла и вещества на поверхности тела от времени):

$$q_m(\tau) = \rho \cdot q_m(\tau) + k_1 \cdot c_q \cdot \gamma_0 \cdot R \cdot \Delta t \cdot e^{k_1 \cdot \tau},$$

$$q_m(\tau) = k_2 \cdot u_0 \cdot R \cdot \gamma_0 \cdot e^{k_2 \cdot \tau},$$

где $q_m(\tau)$ – плотность потока массы вещества кг/(м²·с); γ_0 – плотность абсолютно сухого вещества, кг/м³; k_1 – коэффициент, характеризующий убывание температуры поверхности тела по экспоненциальному закону, 1/с; k_2 – коэффициент сушки, 1/с; $\Delta t = t_{mc} - t_0$; R – радиус цилиндра, м; $u_0 = const$ – частный случай начального влагосодержания; C_q – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Краевую задачу совместного тепло- и массопереноса для капиллярно-пористого тела можно сформулировать следующим образом: требуется решить систему дифференциальных уравнений в частных производных в цилиндрических координатах, предложенную А.В. Лыковым.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon \cdot \rho}{c_q} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) + a_m \cdot \delta \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$(0 < \tau < \tau_1, 0 < r < R),$$

при следующих условиях:

$$t(r, 0) = f_1(r), \quad (3)$$

$$u(r, 0) = f_2(r), \quad (4)$$

где a_q – коэффициент температуропроводности, м²/с; r – текущая координата, м; ε – коэффициент фазового перехода ($0 < \varepsilon < 1$); δ – термоградиентный коэффициент, $\frac{1}{K}$; R – радиус цилиндра, м; τ – время, с; a_m – коэффициент потенциаловлажпроводности м²/с.

Здесь (1) – уравнение теплопереноса; (2) – уравнение массо-(влаго-) переноса; равенства (3) и (4) – начальные условия.

Коэффициенты системы уравнений и граничных условий – постоянные (усредненные) величины, различные для различных этапов процесса.

Теоретический анализ полученных уравнений показал, что с технологической точки зрения рационально создавать такие условия протекания тепло- и массообмена при термической обработке мясных продуктов, при которых теплопроводность превышала бы массопроводность.