

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
МЯСОПРОДУКТОВ ВЛАЖНЫМ ВОЗДУХОМ

54

А.М.Бражников, А.И.Пелеев, А.В.Сафонов, Г.М.Слепых

Рассматривается оптимизация процессов термической обработки мясопродуктов влажным воздухом. В качестве критерия оптимальности выбрано "теплофизическое совершенство процесса". Под теплофизическими совершенством процесса понимается достижение необходимых теплофизических показателей продукта в минимальное время при условии соблюдения технологических ограничений, выраженных через предельные значения температуры поверхности продукта.

Из общей теории процессов переноса следует, что режим, обеспечивающий такое протекание процесса должен быть переменным во времени.

Запишем известное уравнение теплопроводности для шара в следующем виде:

$$\frac{\partial \Theta(x; F_0)}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \Theta(x; F_0)}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial \Theta(x; F_0)}{\partial x} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$\Theta(x; 0) = -h \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial \Theta(x; F_0)}{\partial x} = -Bi [\Theta(1; F_0) - u(F_0)], \quad (3)$$

где Θ - безразмерное значение температуры шара;
 x - безразмерная координата;
 F_0 - критерий Фурье (безразмерное время);
 h - начальная температура;
 Bi - критерий Био;
 $u(F_0)$ - температура окружающей среды, которую мы считаем функцией F_0 , то есть величиной переменной. В процессе охлаждения (нагревания) шара должно выполняться условие

$$\Theta(1; F_0) \geq \bar{\Theta} \quad \text{или} \quad \Theta(1; F_0) \leq \bar{\Theta}, \quad (4)$$

где $\bar{\Theta}$ - температура поверхности.

Решение уравнения (1) с начальными условиями (2 и 3) может быть записано в виде:

$$\Theta(x; F_0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu n \cdot x}{\mu n \cdot x} \cdot Y_n(F_0), \quad (5)$$

где

$$\mu_n = \frac{2(\sin \mu n - \sin \mu n \cos \mu n)}{\mu n - \sin \mu n \cdot \cos \mu n}; \quad n=1; 2; 3$$

μ_n — корень характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \mu = -\frac{\mu}{B_1 - 1}$$

$$y_n(F_0) = h \cdot e^{-\mu_n^2 n F_0} + \mu_n^2 \int_0^{F_0} u(\xi) e^{-\mu_n^2 n (F_0 - \xi)} \cdot d\xi \quad (6)$$

Подставим в выражение (5) значение среднеобъемной температуры шара в безразмерном виде:

$$\tilde{\Theta}(x; F_0) = \frac{3}{2} \int_0^1 x^2 \cdot \Theta(x; F_0) dx$$

Тогда получим:

$$\tilde{\Theta}(x; F_0) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot y_n(F_0), \quad (7)$$

где

$$B_n = \frac{6(\sin \mu n - \sin \mu n \cos \mu n)^2}{\mu n^3 (\mu n - \sin \mu n \cdot \cos \mu n)}$$

Так как относительная среднеобъемная температура шара определяется выражением:

$$\Theta(x; F_0) = \frac{t_K - t(r; \tau)}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (8)$$

где t_K — температура в конце процесса, то конечная относительная температура шара $\tilde{\Theta}_K(x; F_0) = 0$. Это следует из выражения (8), если вместо текущего значения $t(r; \tau)$ подставить t_K .

Откуда:

$$\sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot y_n(F_0) = 0 \quad (9)$$

В этом случае задача оптимизации сводится к решению уравнения (9) с условиями ограничения (4) относительно значения температуры окружающей среды $\mu(F_0)$. Анализ выражений (9) и (4) показывает, что $\mu(F_0) \neq \text{const}$. Если считать, что теплофизические константы мяса в процессе его охлаждения остаются постоянными, то для расчета оптимального режима охлаждения можно непосредственно воспользоваться выражениями (4) и (9).

Ограничения (4) для процесса охлаждения записываются в виде:

$$\Theta(1; F_0) \geq \tilde{\Theta}$$

или

$$\sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot y_n(F_0) \geq 1, \quad (10)$$

где $D_n = \frac{\mu_n \cdot \sin \mu n}{\tilde{\Theta} \cdot \mu n}$

Θ – относительное значение минимально-допустимой температуры поверхности продукта при охлаждении. Так как $B_n \neq 0$, то для выполнения равенства (4) необходимо и достаточно, чтобы функция $y_n(F_0)$ обращалась в нуль при любом значении $n = 1, 2, 3 \dots$. Дифференцируя $y_n(F_0)$ (выражение 6), получим следующую систему уравнений:

$$\frac{dy_n(F_0)}{dF_0} = -\mu^2 n y_n(F_0) + \mu^2 n \mu(F_0); \quad n=1, 2, 3 \quad (II)$$

При использовании первых двух уравнений системы (II) можно получить практически приемлемые приближенные решения оптимальной задачи. Рассмотрим первые два уравнения системы (II) ($n=2$).

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(F_0) &= -\mu_1^2 y_1(F_0) + \mu_1^2 \mu(F_0) \\ \dot{y}_2(F_0) &= -\mu_2^2 y_2(F_0) + \mu_2^2 \mu(F_0) \end{aligned} \quad (II)$$

с начальными условиями:

$$y_1(0) = y_2(0) = -h$$

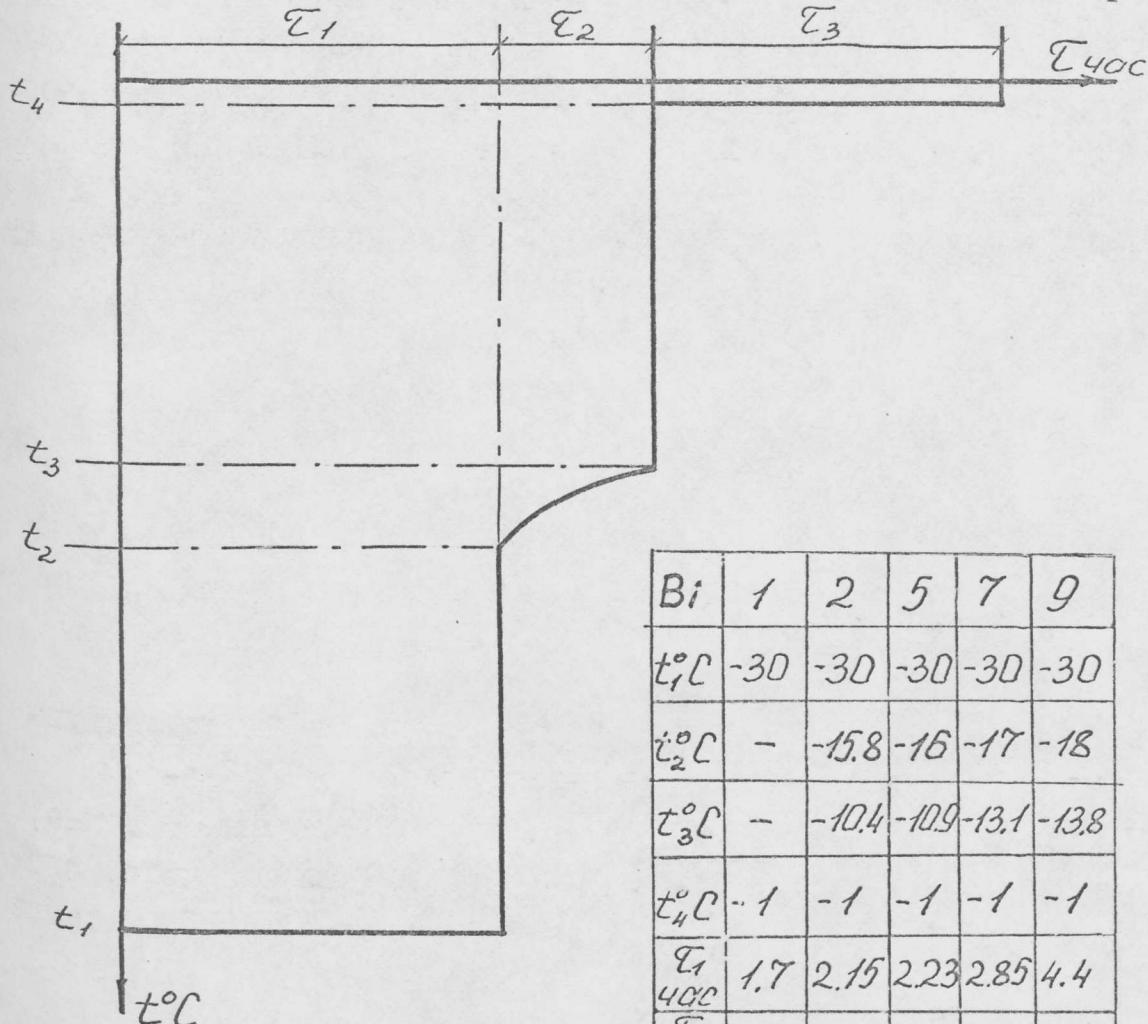
и условиями в конце процесса:

$$y_1(F_{0K}) = y_2(F_{0K}) = 0$$

Условия ограничения для двух членов записываются в виде:

$$D_1 \cdot y_1(F_0) + D_2 \cdot y_2(F_0) \geq 1$$

Результаты численного решения системы (I2) для шара, имеющего все теплофизические характеристики мяса, приведены на рисунке.



Bi	1	2	5	7	9
t_1^oC	-30	-30	-30	-30	-30
t_2^oC	-	-15.8	-16	-17	-18
t_3^oC	-	-10.4	-10.9	-13.1	-13.8
t_4^oC	-1	-1	-1	-1	-1
Σ_{400}	1.7	2.15	2.23	2.85	4.4
Σ_{2400}	-	0.38	1.07	1.19	1.01
Σ_{3400}	0.83	0.89	1.2	1.912	2.85
Σ_{4400}	2.53	3.42	4.53	5.958	8.26

Решения получены для значений от 1 до 9; при этом радиус шара принимали в интервале от 0,05 до 0,15 м.

Режимы термической обработки колбасных изделий нельзя оптимизировать, непосредственно пользуясь выражениями (9) и (4), так как теплофизические константы продукта меняются в процессе их обработки. Однако основные закономерности переноса тепла и массы остаются общими и вывод, полученный нами при анализе общего уравнения переноса, о том что режим должен быть переменным во времени, справедлив и для этих процессов.

Вместе с тем, формулирование критерия "теплофизического со-

вершенства" для процессов термической обработки колбасных изделий требует привлечения эмпирического материала, и поэтому критерий является менее строгим и общим, чем в случае процесса охлаждения. Будем считать, что процессы термической обработки колбасных изделий являются теплофизически совершенными, если соблюдаются следующие условия.

Для процесса подсушки.

Температура поверхности батона в конце процесса подсушки должна составлять 50°C при начальной температуре 20°C .

Движущей силой процесса подсушки должна быть незначительная (по экспериментальным данным 15–20 мм рт.ст.) разность парциальных давлений водяного пара у поверхности оболочки и в паровоздушной среде камеры.

Температура среды в процессе подсушки ограничена "сверху" значением 100°C .

Для процесса обжарки.

Максимальное значение относительной влажности дымо--воздушной среды должно быть таким, чтобы исключить конденсацию влаги на поверхности колбасных батонов. Минимальное значение относительной влажности не должно заметно отличаться от максимального, так как при слишком низкой относительной влажности снижается теплосодержание греющей среды и увеличивается испарение с поверхности батона.

Для процесса сушки сыропичевых колбас.

Температура среды не должна превышать 12°C .

Наружные слои колбасы в конце процесса не должны иметь ниже 23,3% влаги по отношению к сухому остатку, а влажность центральных слоев не должна превышать 37,7% (по экспериментальным данным проф. И.А.Соколова).

Процесс варки колбас фактически заключается в выравнивании температуры по диаметру колбасного батона и поэтому должен осуществляться при постоянных параметрах среды, исключающих заметное испарение влаги с поверхности продукта. Если принять значение температуры греющей среды (t_{ep}) постоянной в процессах подсушки и обжарки, то температура поверхности колбасного батона (t_n) будет меняться в соответствии со следующим выражением:

$$t_n = t_{ep} - (t_{ep} - t_n) e^{-m \tau}, \quad (13)$$

где t_n - начальная температура;
 m - темп;
 τ - время.

Парциальное давление водяного пара у поверхности колбасного батона (P_n) является табличной функцией температуры поверхности, а парциальное давление насыщения среды (P_H) - табличной функцией температуры среды. Так как $t_{\text{ср}} = \text{const}$, то и $pH = \text{const}$. Тогда, чтобы полностью удовлетворить сформулированные выше требования относительная влажность среды во время процесса подсушки должна меняться в соответствии с выражением:

$$\varphi_n = \frac{P_n \cdot n}{P_H \cdot n} = \frac{\delta_1 [t_{\text{ср}} - (t_{\text{ср}} - t_n) \cdot e^{-m_n \tau}] - 15}{\delta_2 (t_{\text{ср}})} \quad (I4)$$

а в процессе обжарки:

$$\varphi_o = \frac{P_n \cdot o}{P_H \cdot o} = \frac{\delta_1 [t_{\text{рж}} - (t_{\text{рж}} - t_n) \cdot e^{-m_o \tau_o}] - 15}{\delta_2 (t_{\text{рж}})} \quad (I5)$$

В выражениях (I4) и (I5) индекс "n" относится к параметрам, характеризующим подсушку, а индекс "o" - обжарку. Процесс сушки сырокопченых колбас можно в первом приближении рассматривать как совокупность двух процессов - испарения влаги с наружной поверхности и диффузии влаги от центра к периферии.

Если считать, что температура среды в процессе сушки является постоянной, то из совместного рассмотрения процессов испарения и диффузии следует, что относительная влажность среды должна меняться в соответствии со следующим выражением:

$$\varphi = [1 - \frac{\mathcal{D}(t)}{K'(t)} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x}] \frac{1}{P_H} \cdot 100\% , \quad (I6)$$

где $\mathcal{D}(t)$ - коэффициент диффузии.

Согласно нашим экспериментальным исследованиям коэффициент диффузии в процессе сушки сырокопченых колбас меняется со следующим выражением:

$$\mathcal{D}(t) = 0,147 \cdot e^{-0,055 \tau} \quad (I7)$$

где $D(t)$ - коэффициент диффузии $\frac{\text{см}^2}{\text{сут.}}$;

τ - время в сутках $0 < \tau < 30$;

$K'(t)$ - коэффициент внешнего массообмена.

Изменение коэффициента внешнего массопереноса в соответствии с нашими экспериментальными данными может быть аппроксимировано следующим выражением:

$$K'(t) = 0,087 \cdot e^{-0,09\tau} \quad (18)$$

где $K'(t)$ - коэффициент внешнего массопереноса, % влаги^x;

P_h - парциальное давление водяных паров у поверхности колбасного батона, являющееся табличной функцией температуры среды;

$\frac{\Delta C}{\Delta X}$ - градиент концентрации влаги, выбираемой на основании критерия теплофизического совершенства.

После подстановки в выражение (16) формул (17) и (18), а также значений P_h и $\frac{\Delta C}{\Delta X}$, оно примет следующий вид:

$$\varphi = [1 - 0,16 \cdot e^{-0,035\tau} \cdot 0,837 \cdot 100] \% \quad (19)$$

где τ - время в сутках $0 < \tau < 30$.

x) Влажность дается в % к $\frac{\text{сух.ост.}}{\text{см}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{мм.рт.ст.}}$