

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БИОПРОДУКТОВ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

М. А. Беляева (Москва)

Научно обоснованная интенсификация процесса тепловой обработки мясных изделий основана на анализе математических зависимостей, позволяющих определить продолжительность тепловой обработки и рациональные параметры режима процесса. С этой целью был реализован планированный эксперимент. На основе неоднократно воспроизведенных экспериментов в качестве основных факторов, оказывающих влияние на процесс тепловой обработки мясных изделий при ИК – облучении, приняты: **X1**, h (см) – расстояние от образца до излучателей; **X2**, δ (мм) – толщина образца; **X3**, E (кВт/м²) – плотность теплового потока; **X4**, T_n (°C) – начальная температура в камере.

Пределы варьирования выбраны на основе предварительно проведенных экспериментальных исследований.

В качестве искомым приняты: **У1** – показатель качества A (балл), **У2** – затраты электроэнергии Q (кВт/ч/кг); **У3** – продолжительность тепловой обработки, τ (мин) и **У4** – потери массы Π (%).

Так как число факторов равно четырем, то при использовании плана эксперимента в виде греко-латинского квадрата необходимо реализовать шестнадцать опытов, варьируя факторы на четырех уровнях (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента в виде греко-латинского квадрата

Факторы	Уровень			
	1	2	3	4
1. Расстояние до излучателей X1 , h , см	5	10	15	20
2. Толщина образца X2 , δ , см	0,05	0,1	0,15	0,2
3. Плотность теплового потока X3 , E , кВт/м ²	4	6	8	10
4. Начальная температура в камере X1 , X4 , T_n , C	140	160	180	200

Таблица 2

Воспроизведение плана эксперимента в виде греко-латинского квадрата

N	$x_{1(\tau)}$	$x_{2(\delta)}$	$x_{3(E)}$	$x_{4(T)}$	$y_1(A)$	$y_2(Q)$	$y_3(\tau)$	$y_4(\Pi)$
1	5	0,05	4	140	3,5	0,08	5	8,3
2	5	0,1	8	200	4,2	0,116	7	14,7
3	5	0,15	10	180	3,6	0,23	14	27
4	5	0,2	6	160	3,8	0,15	9	16,5
5	10	0,05	8	140	4,2	0,1	6	7,8
6	10	0,1	10	180	4,6	0,15	9	10
7	10	0,15	6	200	4,5	0,21	13	17,8
8	10	0,2	4	160	4,9	0,3	18	29
9	15	0,05	8	180	4,2	0,13	8	12
10	15	0,2	4	160	4,8	0,28	17	19
11	15	0,1	6	140	3	0,23	14	14
12	15	0,15	10	200	4	0,2	12	16
13	20	0,1	10	200	4,2	0,38	23	22,2
14	20	0,2	6	180	4	0,23	14	19,6
15	20	0,05	4	160	3,8	0,26	16	16,8
16	20	0,15	8	140	3,9	0,31	19	24

Структура матрицы планирования такова, что при проведении всех экспериментов каждый уровень любого фактора встречается один раз для каждого уровня всех остальных факторов. Для этого каждый уровень каждого фактора в эксперименте задается столько раз, сколько принято уровней. Этим достигается усреднение действия любого фактора.

Опыты проводились на лабораторной ИК-установке.

В качестве исследуемого объекта была выбрана вырезка говяжьего мяса, имеющая широкое кулинарное назначение, масса во всех опытах составляла 50 г.

Готовый продукт подвергали качественному анализу по пяти органолептическим показателям по пятибалльной шкале согласно ГОСТ 16431-70 "Балльный способ выражения показателей качества продукции": внешний вид, цвет, консистенция, вкус, запах (аромат).

Таблица 3

Усреднение результатов опытов

N	Функция	Уровни				Среднее значение
		1	2	3	4	
1. Показатель качества A , балл						
1	A_1	3,775	4,55	4,00	3,975	4,075
2	A_2	3,925	4,00	4,00	4,375	4,075
3	A_3	4,25	3,825	4,125	4,10	4,075
4	A_4	3,65	4,325	4,10	4,225	4,075
2. Затраты электроэнергии Q , кВт/ч/кг						
1	Q_1	0,144	0,19	0,21	0,295	0,209
2	Q_2	0,143	0,219	0,238	0,24	0,209
3	Q_3	0,23	0,205	0,164	0,24	0,209
4	Q_4	0,18	0,248	0,185	0,227	0,209
3. Время тепловой обработки τ , мин						
1	τ_1	8,75	11,5	12,75	18,0	12,75
2	τ_2	8,75	13,25	14,5	14,5	12,75
3	τ_3	14,0	12,5	10,0	14,5	12,75
4	τ_4	11,0	15,0	11,25	13,75	12,75
4. Потери массы P , %						
1	P_1	16,63	16,15	15,25	20,65	17,169
2	P_2	11,23	15,225	21,20	21,025	17,169
3	P_3	18,28	16,975	14,625	18,80	17,169
4	P_4	13,53	20,325	17,15	17,675	17,169

В табл. 3 определены средние значения: $A = 4,075$ балла, $Q = 0,209$ кВт/ч/кг, $\tau = 12,75$ мин, $P = 17,169$ %.

Эмпирические формулы для описания частных зависимостей качества готовых изделий, энергозатрат, продолжительности процесса тепловой обработки и потерь массы в зависимости от параметров ИК-облучения, начальной температуры в камере, начальной толщины образца, плотности теплового потока получены в результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ по методу наименьших квадратов.

Чтобы составить суждение о степени обоснованности принятых параметров, нами определена их значимость. Доверительный интервал определен на основе коэффициента линейной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \sum_1^N (Y_{\text{э}} - Y_m)^2}{(N-K-1) \sum_1^N (Y_{\text{э}} - Y_{\text{,,m}})^2}},$$

критерий значимости для 5%-ного уровня

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{N-K-1}}{1-R^2},$$

где N – число описываемых точек; k – число действующих факторов; $Y_{\text{э}}$ – экспериментальный результат; $Y_{\text{ср}}$ – среднее экспериментальное значение; $Y_{\text{р}}$ – расчетный результат. При анализе $N = 4$, $k = 1$, поскольку учитывается влияние только одного фактора. При этом Y совпадает с общим средним. Экспериментальные значения частных функций приведены в табл. 4.

Таблица 4

Функция	Уровень				Средние значения
	1	2	3	4	
$A_1=3,0625+0,201x_1-0,008x_1^2$	3,775	4,55	4,00	3,975	4,075
$A_2=4,1125-4,8x_2+30x_2^2$	3,925	4,00	4,00	4,375	4,075
$A_3=5,2275-0,3575x_3+0,025x_3^2$	4,25	3,825	4,125	4,10	4,075
$A_4=-6,9625+0,124375x_4-0,00034x_4^2$	3,65	4,325	4,10	4,225	4,075
$Q_1=0,14025-0,00029x_1+0,00039x_1^2$	0,144	0,19	0,21	0,295	0,209
$Q_2=0,0395+2,472x_2-7,4x_2^2$	0,143	0,219	0,238	0,24	0,209
$Q_3=0,49135-0,08893x_3+0,006313x_3^2$	0,23	0,205	0,164	0,24	0,209
$Q_4=-0,317+0,00591x_4-1,6E-05x_4^2$	0,18	0,248	0,185	0,227	0,209
$\tau_1=8,625-0,045x_1+0,025x_1^2$	8,75	11,5	12,75	18,0	12,75
$\tau_2=2,5+149,5x_2-450x_2^2$	8,75	13,25	14,5	14,5	12,75
$\tau_3=29,6-5,3x_3+0,375x_3^2$	14,0	12,5	10,0	14,5	12,75
$\tau_4=-17,7+0,34125x_4-0,00094x_4^2$	11,0	15,0	11,25	13,75	12,75
$\Pi_1=21,71875-,24525x_1+0,05875x_1^2$	16,63	16,15	15,25	20,65	17,169
$\Pi_2=3,10625+175,125x_2-417,5x_2^2$	11,23	15,225	21,20	21,025	17,169
$\Pi_3=32,49625-4,82938x_3+0,342188x_3^2$	18,28	16,975	14,625	18,80	17,169
$\Pi_4=-102,096+1,379813x_4-0,00392x_4^2$	13,53	20,325	17,15	17,675	17,169

Для получения обобщенного уравнения, описывающего технологический процесс тепловой обработки мяса при ИК-облучении, использована формула, предложенная М. М. Протождяконовым:

$$Y_{об} = \frac{\prod_{i=1}^n Y_i}{Y_{сп}^{n-1}},$$

где $Y_{об}$ – обобщенная функция; Y_i – частная функция; Π – произведение всех частных функций.

Итоговые обобщенные уравнения имеют следующий вид:

$$A = 1/(4,075)^2 * (3,0625 + 0,201 * X_1 - 0,008 * X_1^2) * (4,1125 - 4,8 * X_2 + 30 * X_2^2) * (-6,9625 + 0,124375 * X_4 - 0,00034 * X_4^2)$$

$$Q = 1/(0,20975)^2 * (0,14025 - 0,00029 * X_1 + 0,00039 * X_1^2) * (0,0395 + 2,472 * X_2 - 7,4 * X_2^2) * (0,49135 - 0,08893 * X_3 + 0,006313 * X_3^2)$$

$$\tau = 1/(12,75)^2 * (8,625 - 0,045 * X_1 + 0,025 * X_1^2) * (2,5 + 143,5 * X_2 - 450 * X_2^2) * (29,6 - 5,38 * X_3 + 0,375 * X_3^2)$$

$$\Pi = 1/(17,16875)^3 * (21,71875 - 1,24525 * X_1 + 0,05875 * X_1^2) * (3,10625 + 175,125 * X_2 - 4,175 * X_2^2) * (32,49625 - 4,82938 * X_3 + 0,342188 * X_3^2) * (-102,096 + 1,379813 * X_4 - 0,00392 * X_4^2)$$

Для уравнения показателя качества A коэффициент корреляции равен $R = 0,62$, критерий значимости $\tau = 3,21$; для уравнения энергозатрат Q – коэффициент корреляции составляет $R = 0,98$, а значимость $t = 88$. Для обобщенного уравнения определения времени тепловой обработки τ коэффициент корреляции $R = 0,88$, критерий значимости $t = 6,45$. Для уравнения по определению потерь массы Π коэффициент корреляции $R = 0,89$ и критерий значимости $t = 14$.

Выводы

Полученные уравнения позволяют с достаточной точностью определить: качество готовых изделий; количество энергии, затрачиваемое на процесс тепловой обработки; продолжительность процесса тепловой обработки при ИК – облучении. С помощью этих уравнений можно выявить степень влияния каждого исследуемого фактора, а также учесть влияние эффектов межфакторного взаимодействия.