

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНЫХ  
ИЗДЕЛИЙ

М. А. Беяева (Москва)

На основе применения *системного анализа, имитационного моделирования и многокритериальной оптимизации технологий* можно интенсифицировать процесс тепловой обработки мясных продуктов с определением оптимальных технологических режимов, обеспечивающих максимальное сохранение пищевой и биологической ценности продукта. Научно-обоснованная интенсификация инфракрасной тепловой обработки мясных изделий основывается на анализе математических зависимостей массовых долей элементов химического состава продукта и их ингредиентов от температуры, интенсивности теплового потока и других факторов и связана с определением их оптимальных значений по различным критериям [1].

Была разработана обобщенная математическая модель по изменению температуры и уравнений регрессий по изменению аминокислотных и жирокислотных составов в зависимости от температуры, времени и условий нагрева, были использованы статистические данные физико-химических показателей.

**Конкретная математическая модель** многокритериальной оптимизации теплового процесса ИК-обработки по критериям минимума потерь пищевой и биологической ценности мясoproдукта (на примере кускового мяса из говяжьей вырезки, бифштекса рубленного и рецептурных композиций) в результате его тепловой обработки:

*На первом этапе* отыскивается оптимальное значение температуры нагрева путем составления множества локально-оптимальных решений по критериям минимального отклонения от исходной структуры массовых долей:

– аминокислот  $ma_i$

$$\psi(a) = \sum_{i=1}^{17} (ma_i^0 - ma_i^t)^2 ; \quad (1)$$

– жирных кислот  $mq_j$

$$\psi(q) = \sum_{j=1}^{25} (mq_j^0 - mq_j^t)^2 ; \quad (2)$$

– витаминов  $mv_k$

$$\psi(v) = \sum_{k=1}^7 (mv_k^0 - mv_k(t))^2 ; \quad (3)$$

– показателей пищевой ценности продукта

$$\psi = (b_0 - b(t))^2 + (q_0 - q(t))^2 , \quad (4)$$

где  $b_0, b(t)$  – массовые доли белка (до и после термообработки) при исходной  $t_0$  и текущей температурах;  $q_0, q(t)$  – массовые доли расплавленного жира в продукте при начальной  $t_0$  и текущей  $t$  температурах;

$$m_{\delta}(t) = 36.436 + 0.096t - 0.001t^2; \quad (5)$$

$$m_{ис}(t) = -8.974 + 0.017\tau + 0.12t; \quad \tau - \text{время обработки.} \quad (6)$$

Начальные значения массовых долей могут быть определены как постоянные коэффициенты уравнений регрессии, т. е. при  $t = 0$ .

Оптимальная температура по каждому критерию отыскивается одним из методов одномерной оптимизации, например, методом дробного шага на унимодальном

участке изменения критерия в интервале  $t_0, t_{max}$  (рис. 1) или методом прямого перебора от 0 до  $t_{max}$  с нахождением всех локальных экстремумов и выделением унимодальных участков функции.

Из четырех локально-оптимальных решений ( $k = 1, 4$ ) определяется лучшая альтернатива по функции полезности как

$$\min \Phi_k = \sum_{l=1}^4 \left( \frac{\Psi_k^{opt} - \Psi_{kl}}{\Psi_k^{opt}} \right)^2; \quad k = \overline{1, 4}, \quad (7)$$

где  $\Psi_k^{opt}$  – оптимальная величина  $k$ -го критерия;  $\Psi_{kl}$  – значение  $k$ -го критерия в  $l$ -й альтернативе, или функционалу качества.

**Второй этап** заключается в нахождении оптимальных технологических параметров ИК-обработки мясopодуKтов: расстояния образца до излучателей –  $x_1$  (см); толщины образца  $x_2$  (мм); плотности лучистого теплового потока  $x_3$  (кВт/м<sup>2</sup>); начальной температуры в камере  $x_4$  (°C), обеспечивающих: максимальное значение показателя качества  $y_1=A$  (балл); минимум затрат электроэнергии  $y_2=Q$  (кВт/ч/кг); минимум времени тепловой обработки  $y_3=\tau$  (мин); минимум потерь массы  $y_4=П$  (%). Экстремальные значения перечисленных критериев, представляемых сепарабельными функциями (1) ÷ (7), в заданных границах варьирования технологических параметров  $x_1 \div x_4$  находятся методом сепарабельного программирования с покоординатным поиском локально-оптимальных решений каждому критерию.

Выбор наилучшей альтернативы определяется функцией полезности  $\Phi_k$  в виде суммы квадратов отклонений получаемых значений критериев  $y_i$  от их локальных экстремумов  $y_i^{opt}$  (рис. 2).

На основании имитационного моделирования была разработана компьютерная экспертная система, которая функционирует в средах *Windows 95/NT/98/ME/2000/XP/2003* и приложениях *Microsoft excel*.

Интерфейсы реализованы в *Delphi*, основные процедуры – в *Object Pascal* и *VBA*. Для вывода некоторых результатов вычислений используются элементы *MSFlexGrid*.

Система включает *четыре подсистемы* с программными модулями информационного и интеллектуального обеспечения, базами данных с физико-химическими показателями продуктов и таблицами планирования экспериментов, модулем статистической обработки результатов экспериментов, банком статистических моделей в виде уравнений регрессий, объединенных в обобщенные модели, а также модули многокритериальной и структурно-параметрической оптимизации с процедурами прогноза и диагноза состояния системы и оценкой качества продукта.

Подсистема моделирования биотепломассообменных процессов содержит:

- моделирование параметрических полей изменения температуры, влажности и биологических компонентов продукта в процессе нагрева, предназначенное для расчета оптимальных технологических режимов и выбора энергоподвода (ИК-, СВЧ-, конвекция) тепловой обработки мясopодуKтов с максимальным сохранением биологической и пищевой ценности.

- проверку адекватности разработанных моделей распределения температуры и влаги в продукте и обобщенной модели изменения биологических компонентов мясного продукта;

- модуль регулирования и контроля температуры, разработанный в среде *Labview* – графическое представление изменения температуры и массовых долей аминокислот, жирных кислот и витаминов в различных точках мясopодуKта в зависимости от его геометрической формы (цилиндр, прямоугольник).

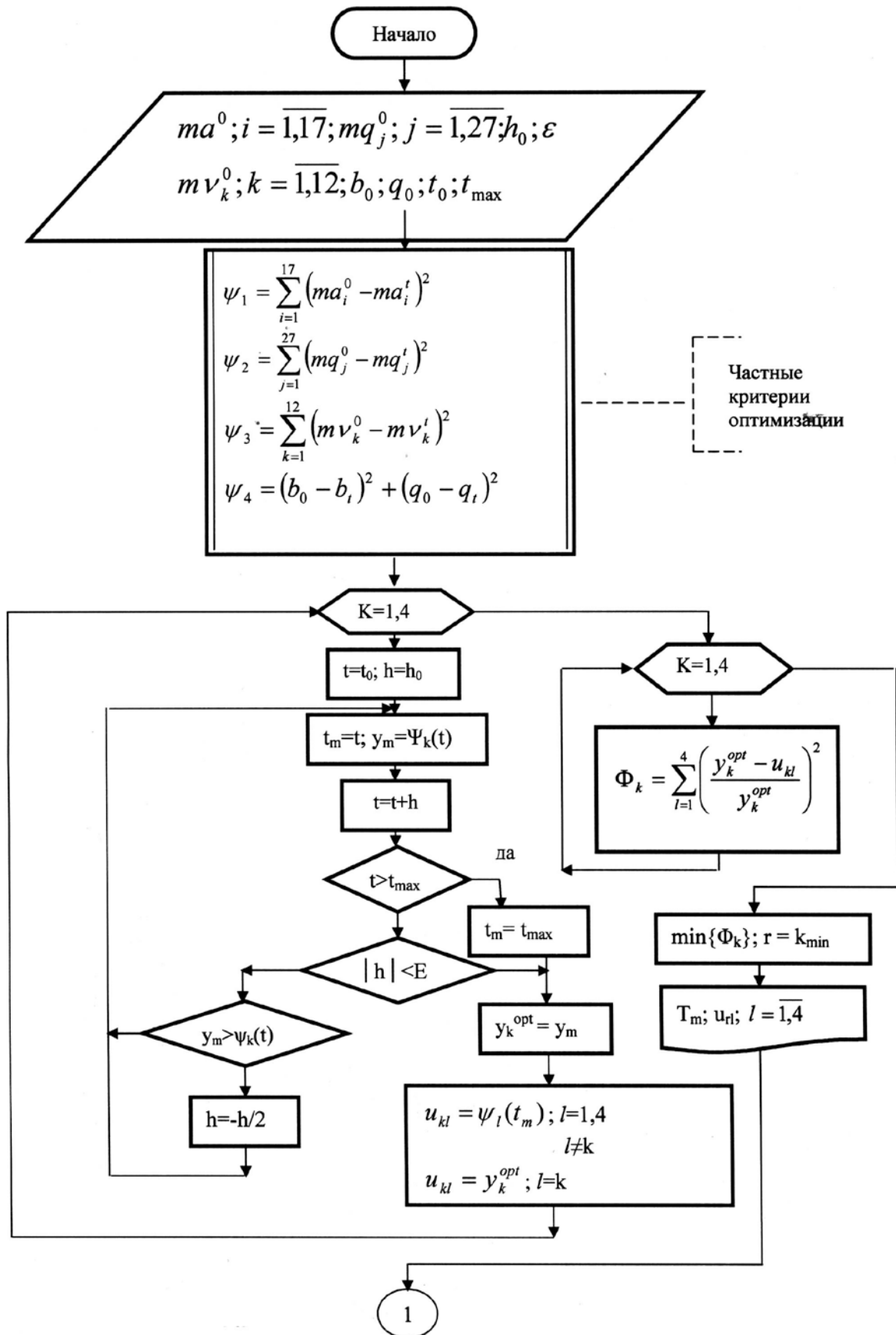


Рис. 1. Блок-схема алгоритма многокритериальной оптимизации процесса ИК-обработки мясородуктов (начало)

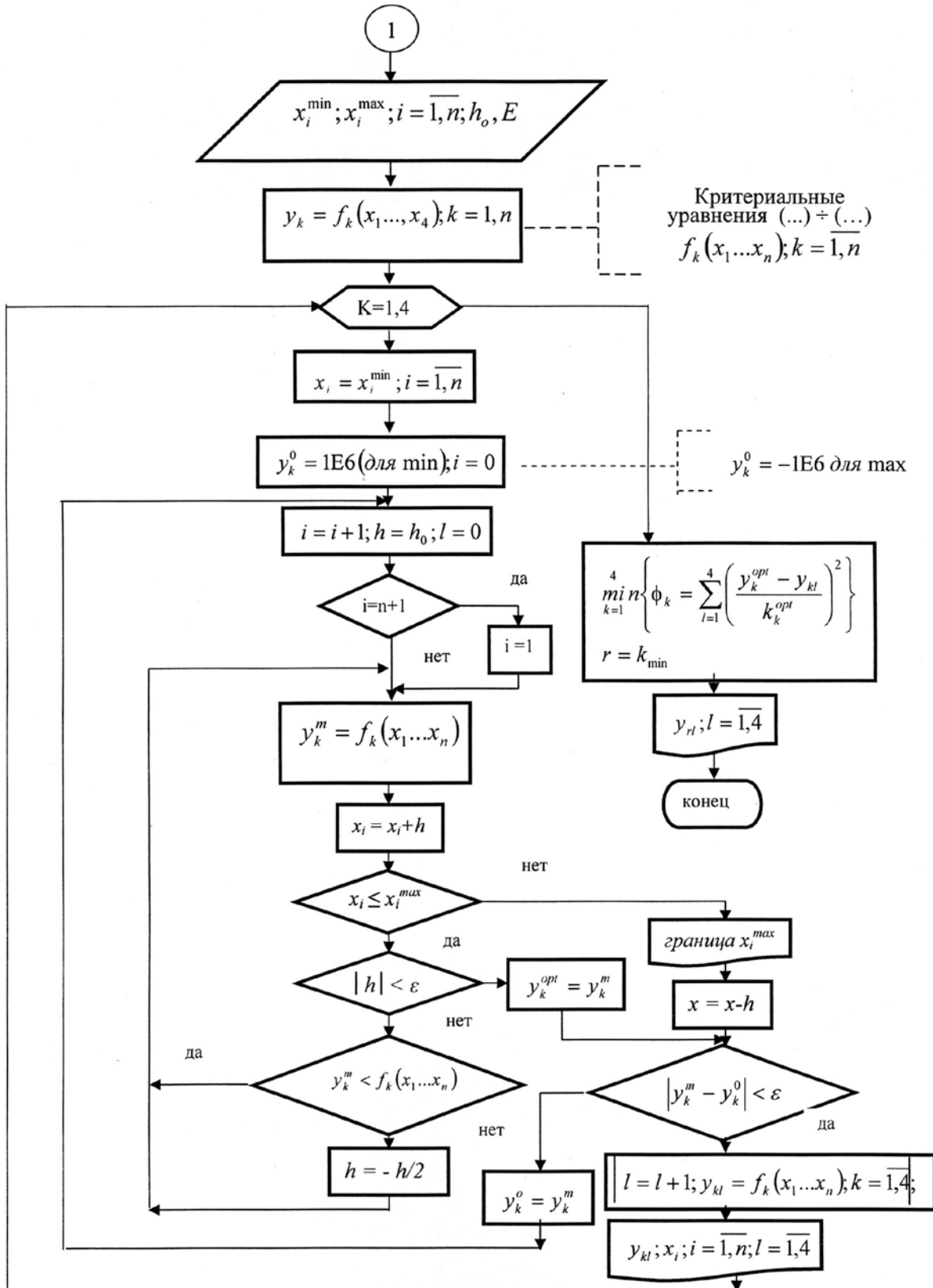


Рис. 2. Блок-схема алгоритма многокритериальной оптимизации процесса ИК-обработки мясопродуктов (окончание)

На рис. 3, 4, 5 приведены некоторые интерфейсы доступные пользователю – технологам общественного питания и работникам торговли.

**Расчет оптимальной температуры ИК-нагрев...**

Исходные данные  
 $T_{\min}=80$      $T_{\max}=100$   
 $T_0=90$      $T_h=5$   
 $\epsilon_{ps}=0,01$

Критерий оптимизации  
 Аминокислотный состав  
 Жирокислотный состав  
 Витаминный состав  
 Пищевая ценность  
 Энергетическая ценность

Регрессионные модели      Вычислить

Результаты

Оптимальное значение температуры	80
Изменение аминокислотного состава	0,04355
Изменение жирокислотного состава	0,68522
Изменение витаминного состава	0,16595
Изменение пищевой ценности	0,14235
Изменение энергетической ценности	6,88520

Функционал качества  
 Вычислить      0,84341

Назад      Продолжить

Рис. 3. Вывод результатов оптимизации по расчету биологической, пищевой и энергетической ценности для кускового мяса из говяжьей вырезки в процессе инфракрасной обработки

**Говяжья вырезка**

Исходные данные

$h_{\min}=0,005$	$h_{\max}=0,02$	4,57	0,06	3,82	6,44
$s_{\min}=0,01$	$s_{\max}=0,03$	0,02	0,01	2,50	70,00
$E_{\min}=2,5$	$E_{\max}=3,5$	4,57	0,06	3,82	6,44
$t_{\min}=70$	$t_{\max}=100$	0,02	0,01	2,50	70,00

Вычислять

Назад

Выход

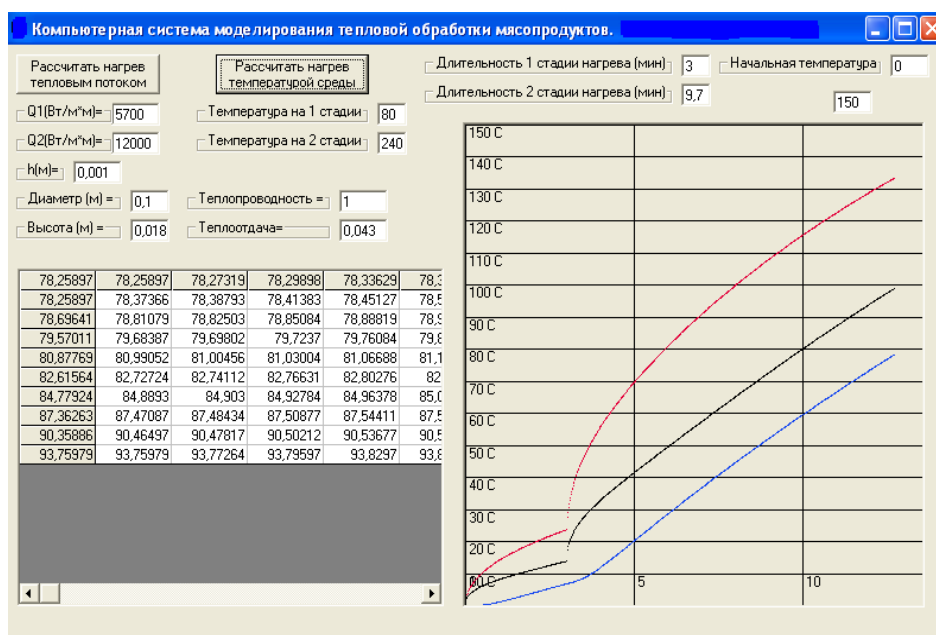
Изменяемые параметры

	h	s	E	t
h - расстояние от образца до излучателя [м]	0,02	0,01	3,49375	100
s - толщина образца [м]	0,02	0,01	3,49375	100
E - плотность теплового потока [кВт/м:2]	0,02	0,01	3,49375	100
t - температура в камере [град С]	0,02	0,01	3,49375	70

Значения функций

	A	Q	T	П
<input checked="" type="checkbox"/> A - показатель качества [баллов]	5,00	0,05	3,17	31,00
<input checked="" type="checkbox"/> Q - затраты электроэнергии [кВт/ч/кг]	5,00	0,05	3,17	31,00
<input checked="" type="checkbox"/> T - продолжительность тепловой обработки [мин]	5,00	0,05	3,17	31,00
<input checked="" type="checkbox"/> П - потери массы [%]	4,57	0,05	3,17	5,65

Рис. 4. Вывод результатов многокритериальной оптимизации для кускового мяса



**Рис. 5. Расчет температурного поля замороженных мясных продуктов цилиндрической формы при изменении температуры греющей среды (начальная температура продукта 0 °С;  $t_1 = 80$  °С,  $t_2 = 240$  °С)**

Работа с пользователем в компьютерной системе организована в виде диалогового режима. Запрашивается либо температура греющей среды, либо плотность лучистого потока, вводим либо температуру, либо плотность лучистого потока в специальные окна. Специальные окна предусмотрены для ввода теплофизических параметров, начальной температуры продукта. Осуществляется ввод запрашиваемых параметров, затем, после реализации программы вывод, искомым результатов на печать: изменение температуры и массовых долей аминокислот в центре продукта и в отдельных узлах или точках мясoproducta в графическом интерфейсе, подбирается технологический режим, при котором готовый продукт имеет органолептические показатели, пищевую и биологическую ценность в соответствии с максимальным значением функционала качества [2].

Таким образом, имитационное моделирование и оптимизация позволяют управлять тепловым процессом: регулируя температуру греющей среды или плотность лучистого потока энергии инфракрасного излучения, соответственно регулировать содержание массовых долей биологических компонентов продукта.

### Литература

1. **Беляева М. А.** Моделирование и оптимизация управления качеством мясных изделий в процессе тепловой обработки. М.: Франтера, 2006, 248 с.
2. **Беляева М. А.** Экспертная система моделирования и оптимизации тепловой обработки мясных изделий или проектирование пищевой и биологической ценности мясных продуктов с учетом теплообмена. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006613723 по заявке № 2006612935 от 29.08.2006 г.