

Исследование процесса термообработки сосисок инфракрасным излучением

Демидов А.С., Демидов С.Ф., Пятницков В.А.
demidovserg@mail.ru

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.
Институт холода и биотехнологий*

Проведено исследование процесса термообработки сосисок инфракрасным излучением. Определены факторы, в наибольшей степени влияющие на время термообработки. Получено уравнение регрессии для расчета времени тепловой обработки сосисок инфракрасным излучением при выбранных технологических параметрах.

Ключевые слова: термообработка, сосиска, инфракрасное излучение.

Мясоперерабатывающая промышленность относится к одной из важнейших отраслей пищевой индустрии, призванной удовлетворять растущие потребности населения в высококачественных мясных продуктах.

В рационе человека мясо составляет главнейший источник полноценного белка, жиров, витаминов, минеральных веществ, микроэлементов и других жизненноважных продуктов.

Значительный удельный вес в технологии приготовления продуктов питания с использованием мясного сырья занимает тепловая обработка в различных греющих средах и условиях энергоподвода. Для этого широко используются пароконвектоматы, микроволновые печи с режимами СВЧ-нагрева, комбинированные с СВЧ- и последующей ИК-обработкой, режимы «Гриль», при которых продукты подвергают воздействию инфракрасного облучения.

Однако в сложившейся ситуации на пищевых предприятиях среднего и малого бизнеса во многих случаях применяется устаревшее оборудование различных фирм-производителей, в том числе кустарного производства. При этом режимы тепловой обработки зачастую далеки от рациональных, следствием чего является перерасход электроэнергии и неудовлетворительное качество готовых пищевых продуктов.

В связи с этим становится актуальной и своевременной проблема системных исследований и разработки, научно обоснованных рациональных режимов подвода энергии в процессах термообработки мясных продуктов, повышения технического уровня аппаратного оформления, условий эксплуатации, резервов экономии электроэнергии и обеспечение заданного стабильного уровня качества готовой продукции. Поэтому дальнейшее развитие таких электрофизических методов как электротермия (ВЧ и СВЧ,

инфракрасный нагрев, электростатическое поле, ультразвук, импульсная техника) для интенсификации процессов теплообмена и совершенствования аппаратов, в которых осуществляется тепловая обработка, является социально значимым и актуальным.

Данная работа посвящена исследованию процесса тепловой обработки сосисок при ИК-энергоподводе.

Для исследования процесса термообработки сосисок был разработан экспериментальный стенд, рисунок 1.

В камере установлены инфракрасные излучатели [1]. В качестве генераторов ИК излучения применены линейные кварцевые излучатели диаметром 0.012 м с функциональной керамической оболочкой. Излучатели токосъемными втулками установлены в цанговых зажимах электропитания, смонтированных на диэлектрических параллельных опорах. Каждый излучатель устанавливается в фокусе параболического отражателя. ИК-излучатели установлены сверху относительно сетчатого поддона. ИК-излучатели и сетчатый поддон могут перемещаться с помощью направляющих в вертикальном направлении. На сетчатый поддон помещается исследуемый продукт. Перемещение поддона позволяет регулировать расстояние между инфракрасными излучателями и поддоном. Под сетчатым поддоном, на расстоянии 20 мм, расположен отражатель из нержавеющей полированной стали. Использование отражателя позволяет создать более равномерный тепловой поток и повысить эффективность работы установки.

Для регулировки плотности потока, падающего на сосиски, меняются значения сопротивления нихромовой спирали ИК-излучателя.

Для измерения напряжения на клеммах ИК-излучателей в диапазоне 210-220В используется вольтметр.

Для снятия температурных полей в сосиске используются хромель-алюмелевые ТХА 9419-23 термопары градуировки ХА₉₄ с диаметром проволоки $6 \cdot 10^{-4}$ м. Перед каждой серией опытов термопары градуируются в диапазоне 0-300°C. Погрешность измерения температуры не превышает $\pm 1.5^\circ\text{C}$ в диапазоне 0-300°C, ГОСТ Р 8.585 – 2001.

Измерение температуры поверхности облучаемого материала производится при помощи дистанционного неконтактного инфракрасного термометра Raytek MiniTemp МТ6. Термометр данной модификации специально разработан для применения в пищевой промышленности.



Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования процесса тепловой обработки сосисок инфракрасным излучением.

1 – сушильная камера, 2 - хромель-алюмелевые ТХА 9419-23 термопары, 3 - датчики плотности теплового потока ДТП 0924-Р-О-П-50-50-Ж-О, 4 - измеритель теплопроводности ИТ-2, 5 - персональный компьютер.

Измерение плотности теплового потока осуществлялось при помощи термоэлектрических датчиков плотности теплового потока ДТП 0924-Р-О-П-50-50-Ж-О.

Измеритель теплопроводности ИТ-2 в комплекте с датчиками плотности теплового потока и ТХА (ХА₉₄) термопарами используется в качестве устройства автоматизированного сбора и обработки информации.

Предварительно подготовленное колбасное изделие – молочную сосиску (очищенную от оболочки) помещали на сетчатый поддон в сушильную камеру, где при заданных параметрах, продукт подвергался ИК-облучению. Диаметр исследуемых сосисок составлял 15 мм. Расстояние между ИК-излучателями составляло 60 мм.

Температуру поверхности продукта, находящегося в сушильной камере, измеряли неконтактным инфракрасным термометром Raytek MiniTemp МТ6. Температуру в центре, в толще сосиски определяли с помощью термопар.

Продолжительность ИК-обработки при заданной плотности теплового потока ИК излучения определяется временем достижения заданной температуры в центре сосиски 70-75°C [2].

Основными факторами, в наибольшей степени влияющими на время и качество процесса термообработки сосисок при ИК-энергоподводе являются: плотность теплового потока ИК излучения, расстояние от ИК-излучателя до продукта. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны значения уровней каждого фактора, с учетом диапазонов технологических параметров.

Рассматриваемые факторы имеют количественную природу. Кодирование этих количественных факторов и определение их уровней

проводилось с использованием безразмерных переменных по следующим формулам перехода [3]:

- по плотности теплового потока

$$x_1 = \frac{z_1 - 2,89}{0,44},$$

- по расстоянию от ИК-излучателя

$$x_2 = \frac{z_2 - 50}{10}.$$

Таблица 1.

Значения уровней факторов ПФЭ

Обозначение	Наименование факторов	Уровень		
		нижний -1	основной 0	верхний +1
Z_1	Плотность теплового потока ИК излучения, кВт/м ²	2,45	2,82	3,33
Z_2	Расстояние от ИК-излучателя до продукта, мм	40	50	60

Кодированные переменные x_1 , x_2 принимают значения в диапазоне от -1 до +1. Таким образом, для достоверного учета влияния каждого из факторов требуется трехуровневый план, в котором реализованы все возможные комбинации факторов на всех уровнях. В таблице 2 приведена матрица планирования полного факторного эксперимента 3².

Таблица 2.

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат		y, c
	z_1	z_2	x_1	x_2	
1	2,45	40	-1	-1	330
2	3,33	40	+1	-1	210
3	2,45	60	-1	+1	840
4	3,33	60	+1	+1	660
5	2,82	50	0	0	510
6	3,33	50	+1	0	435
7	2,45	50	-1	0	585
8	2,82	60	0	+1	750
9	2,82	40	0	-1	270

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов. Пользуясь планом, представленным в таблице 2, сначала вычислим коэффициенты линейного уравнения регрессии:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ji}}{N}$$

где x_{ji} — значение j -го фактора в i -ом опыте, u, j - номера факторов, $j, u=0, 1, \dots, k, j \neq u$.

Коэффициенты регрессии равны:

$$b_1 = -75,$$

$$b_2 = 240.$$

Далее рассчитаем коэффициенты b_{11} и b_{22} и коэффициент парного взаимодействия b_{12} . Для этого составим дополнительную таблицу (таблица 3). Значения x_i^2 рассчитываются по формуле:

$$(x_i')^2 = x_i^2 - \frac{\sum x_i^2}{N} = (-1)^2 - \frac{6}{9} = 0,33$$

Таблица 3.

Расширенная матрица ортогонального планирования

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$(x_1\check{y})^2$	$(x_2\check{y})^2$	$x_1 x_2$	y
1	+1	-1	-1	+0,33	+0,33	+1	330
2	+1	+1	-1	+0,33	+0,33	-1	210
3	+1	-1	+1	+0,33	+0,33	-1	840
4	+1	+1	+1	+0,33	+0,33	+1	660
5	+1	0	0	-0,67	-0,67	0	510
6	+1	+1	0	+0,33	-0,67	0	435
7	+1	-1	0	+0,33	-0,67	0	585
8	+1	0	+1	-0,67	+0,33	0	750
9	+1	0	-1	-0,67	+0,33	0	270

Коэффициенты рассчитаем по формулам:

$$b_{11} = \frac{\sum \left((x_1')^2 y \right)}{2}; \quad b_{22} = \frac{\sum \left((x_2')^2 y \right)}{2}; \quad b_{12} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^9 x_1 x_2 y_i$$

$$b_0 = \frac{\sum (x_0 y)}{9} - 0,67 b_{11} - 0,67 b_{22}$$

$$b_{11} = 28,35; \quad b_{22} = -7,65; \quad b_{12} = -15; \quad b_0 = 496,14.$$

В результате расчета было получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 496,14 - 75x_1 + 240x_2 + 28,35x_1^2 - 7,65x_2^2 - 15x_1x_2$$

В центре плана поставлено дополнительно три параллельных опыта и получены следующие значения y

$$y_1^0 = 515 \text{ с}; y_2^0 = 500 \text{ с}; y_3^0 = 520 \text{ с};$$

$$\bar{y}^0 = \frac{\sum_{u=1}^3 y_u^0}{3} = 511,67$$

$$s_{\bar{y}^0}^2 = \frac{\sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2}{2} = 72,22; \quad s_{\bar{y}^0} = 8,5;$$

$$s_{b_1} = \frac{s_{\bar{y}^0}}{\sqrt{N}} = \frac{8,5}{\sqrt{9}} = 2,83$$

Оценим значимость коэффициентов по критерию Стьюдента:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{s_{b_0}} = \frac{496,14}{2,83} = 175,31; \quad t_1 = \frac{|b_1|}{s_{b_1}} = \frac{75}{2,83} = 26,50;$$

$$t_2 = \frac{|b_2|}{s_{b_2}} = \frac{240}{2,83} = 84,80; \quad t_{11} = \frac{|b_{11}|}{s_{b_{11}}} = \frac{28,35}{2,83} = 10,01;$$

$$t_{22} = \frac{|b_{22}|}{s_{b_{22}}} = \frac{7,65}{2,83} = 2,70; \quad t_{12} = \frac{|b_{12}|}{s_{b_{12}}} = \frac{15}{2,83} = 5,30.$$

Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $p=0,10$ и числа степеней свободы $f=2$ - $t_p(f) = 2,92$. Таким образом коэффициент b_{22} незначим и его следует исключить из уравнения. После исключения незначимого коэффициента уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = 496,14 - 75x_1 + 240x_2 + 28,35x_1^2 - 15x_1x_2. \quad (1)$$

Проверим адекватность полученного уравнения по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{\hat{y}}^2}{s_{\bar{y}^0}^2};$$

$$s_{\bar{y}^0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-l} = \frac{1822}{4} = 455,5;$$

$$s_{\hat{y}}^2 = 72,22;$$

l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, равное 5.

Тогда $F = \frac{455,5}{72,22} = 6,31$. Табулированное значение критерия Фишера

для $p=0,10, f_1=4, f_2=2, F_{1-p}(f_1, f_2) = 9,24, F < F_{1-p}(f_1, f_2)$.

Следовательно, полученное уравнение адекватно описывает эксперимент.

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\hat{y} = 519,73 - 845,4z_1 + 33,86z_2 + 146z_1^2 - 3,41z_1z_2 \quad (2)$$

Полученное уравнение (2) позволяет рассчитать время термообработки сосисок в зависимости от плотности теплового потока, расстоянии от ИК-излучателя до продукта.

На рисунках 2 и 3 представлены температурные кривые процесса термообработки сосисок при инфракрасном излучении.

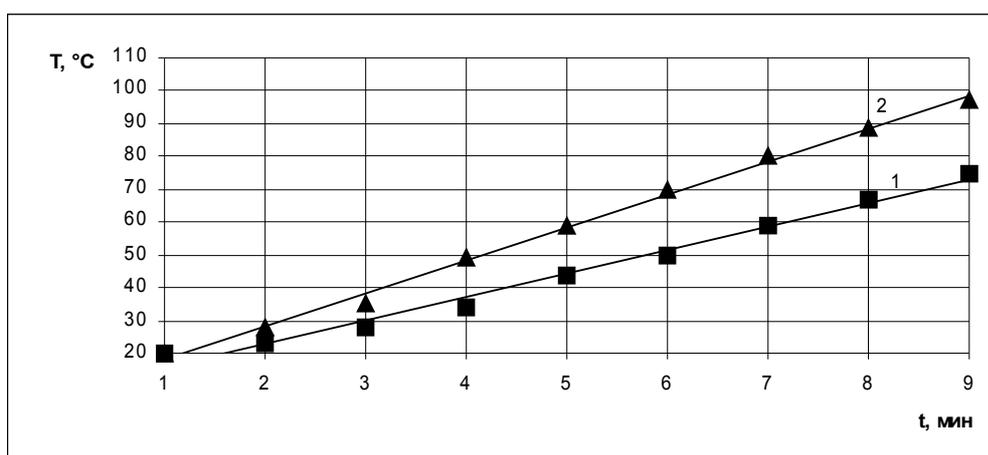


Рис. 2. Температурные кривые процесса термообработки сосисок при $z_1=2,82 \text{ кВт/м}^2$, $z_2=50 \text{ мм}$, 1 – температура в центре; 2 - температура на поверхности.

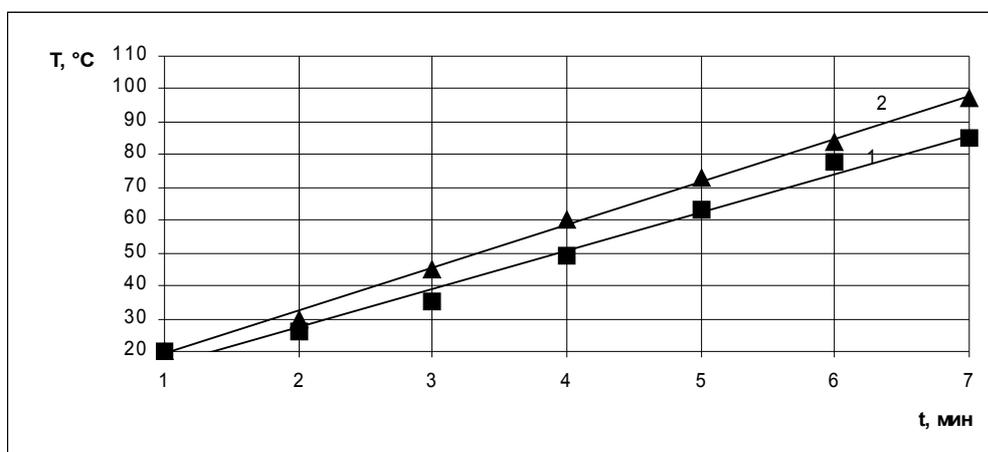


Рис. 3. Температурные кривые процесса термообработки сосисок при $z_1=2,45 \text{ кВт/м}^2$, $z_2=40 \text{ мм}$, 1 – температура в центре; 2 - температура на поверхности.

Отмечалось быстрое повышение температуры на поверхности сосиски. Температура в центре также повышается, но несколько медленнее. Таким образом, в материале возникает температурный градиент.

Продолжительность ИК-обработки до кулинарной готовности сосиски при заданной плотности теплового потока ИК излучения определяется временем достижения заданной температуры в центре сосиски $70-75^\circ\text{C}$.

Для определения оптимальных режимов процесса термообработки сосисок в качестве критерия оптимизации был принят минимум выходного параметра, поскольку именно в минимизации времени тепловой обработки

заключается интенсификация процесса термообработки сосисок с учетом качества готового продукта при минимальных энергозатратах.

Анализ результатов показал, что такие значения - $z_1=2,45$ кВт/м², $z_2=40$ мм. При таких значениях параметров оптимальное значение $Y=320..340$ с.

Список литературы:

1. Демидов С.Ф., Демидов А.С., Беляева С.С. Источники инфракрасного излучения с энергоподводом для термообработки пищевых продукто/ С.Ф. Демидов, А.С. Демидов, С.С. Беляева// Научный журнал Процессы и аппараты пищевых производств СПб НИУ ИТМО [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2012 - №2. – март. – Режим доступа: www.open-mechanics.com/journals

2.Лаврова Л.П., Крылова В.В. Технология колбасных изделий. М.: Пищевая промышленность, 1975. – 344 с.

3.Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технике: учеб. пособие для хим.-технол. вузов. – 2-е изд., перераб. и допол. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

Investigation of the heat treatment process of sausages by infrared radiation

Demidov A.S., Demidov S.F., Pyatnitskov V.A.
demidovserg@mail.ru

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnologies

Heat treatment process of sausages by infrared radiation is investigated. The factors most influence on the heat treatment are obtained. Regression equations to calculate the time cooking sausages infrared radiation at selected process parameters are obtained.

Keywords: heat, sausage, infrared radiation