

УДК 664.002.5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗНОГО РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ КУЛИНАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Смагин Д.А., к.т.н.,

Смоляк А.А., к. т. н.

Могилевский государственный университет продовольствия

Тел. +375295443263

Аннотация – в статье приведены результаты исследований по разработке методики прогнозного расчета продолжительности тепловой обработки кулинарных изделий в среде нагретого воздуха и перегретого водяного пара.

Ключевые слова – прогнозный расчет, тепловая обработка, продолжительность, жарочный шкаф, парожарочный шкаф, нестационарная теплопроводность, нагревание.

Повышение эффективности тепловой обработки пищевых продуктов в жарочных и парожарочных шкафах может реализоваться путем разработки методики, позволяющей прогнозировать продолжительность их тепловой обработки. Подобная методика обеспечит возможность повышения потребительских характеристик готовой продукции, совершенствования оперативного производственного планирования, обеспечит ритмичность производства, позволит составить рациональные графики выпуска продукции и эффективно использовать рабочую силу.

С позиций учения о теплопроводности, тепловая обработка пищевых продуктов в жарочных и пароконвекционных шкафах классифицируется как переходный процесс нестационарной теплопроводности: продукт с одинаковой температурой во всех точках в начальный момент времени погружается в рабочую камеру аппарата с неизменной температурой греющей среды. Представление о наличии нестационарной теплопроводности при тепловых процессах пищевых продуктов нашли применение в вопросах, относящихся к технологии консервирования мяса [1, 2]. На основе данного представления Бол С. и Ольсон Ф. [3] предложили методы контроля процессов пастеризации и стерилизации консервов. Были также изучены вопросы теплообмена при охлаждении тел [2, 4].

Однако, не рассматривались вопросы применения закономерностей нестационарной теплопроводности по отношению к тепловой обработке кулинарных изделий. На условия нагревания кулинарной продукции влияет большое количество переменных величин, связанных со свойствами обрабатываемых изделий, — внутренняя макроскопическая неоднородность, сложность стереометрической формы, наличие физико-химических и массообменных процессов, изменение теплофизических свойств, испарение влаги с поверхности, образование корки.

Исходя из результатов литературного поиска, принято решение о разработке методики прогнозного расчета процесса тепловой обработки пищевых продуктов. В основу методики положены известные математические зависимости, описывающие нагревание тел при нестационарной теплопроводности.

В качестве объектов теоретических исследований взяты картофель и мясные котлеты.

При разработке методики принимаем ряд допущений:

- объекты исследований условно рассматриваем как однородные тела;
- теплотой, поступающей от поверхности противня (функциональной емкости), пренебрегаем;
- за модель тела принимаем бесконечный цилиндр, за определяющий размер принимаем диаметр;
- физико-химическими и массообменными процессами, протекающими в исследуемых изделиях, пренебрегаем.

Продолжительность тепловой обработки кулинарных изделий определяется количеством времени, необходимого для нагревания всего объема заготовки до достижения температуры, определяющей кулинарную готовность. Как правило, за критерий кулинарной готовности принимается температура в центре изделия, равная 85°C, что обусловлено технологическими и санитарно-гигиеническими требованиями, предъявляемыми к готовой продукции [5].

Процесс нагревания однородных тел характеризуется безразмерной температурой тела [6]

$$\Theta = \frac{t_{ж} - t}{t_{ж} - t_0}, \quad (1)$$

где t — температура тела в момент времени $\tau > \tau_0$, °C;

$t_{ж}$ — некоторая фиксированная температура °C;

t_0 — начальная температура тела, °C.

Безразмерная температура тела определяется безразмерной координатой, числом Био и числом Фурье /6/.

Безразмерная координата ξ определяется по формул [6]

$$\bar{\xi} = \frac{\xi}{l}, \quad (2)$$

где ξ – координата;

l – характерный линейный размер, м.

Число Био определяется по формуле [6]

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала тела, Вт/(м·°C);

α – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к нагреваемому телу, Вт/(м²·°C).

Число Фурье определяется по формуле [6]

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала тела, м²/с.

Уравнение, описывающее нестационарное температурное поле в теле, имеет следующий вид [6]

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} A(\mu_n) U(\mu_n \bar{\xi}) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (5)$$

где A , U – табличные функции;

μ_n – корни характеристического уравнения $\mu = \mu(Bi)$.

Уравнение (5) описывает температурное поле тела при неупорядоченном режиме теплопроводности, характеризующимся большим влиянием начального распределения температуры.

При $Fo \geq 0,3$ ряд (5) становится настолько быстро сходящимся, что для практических расчетов достаточно ограничиться первым членом. В этом случае изменение во времени безразмерной температуры Θ_0 на оси цилиндра $r = 0$ описывается уравнением [6]

$$\Theta_0 = N(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает температурные изменения при регулярном режиме теплопроводности. На данной стадии процесс полностью определяется условиями нагревания на границе тела и

среды, физическими свойствами тела, его геометрической формой и размерами.

Проверяем возможность расчета процесса нагревания исследуемых изделий для регулярного режима. Средний радиус натуральных рубленых изделий типа котлет и шницелей составляет 10...15 мм [5], средний радиус картофеля – 15...20 мм. Для расчетов принимаем величину определяющего линейного размера, равную $r = 15$ мм. Продолжительность запекания картофеля в жарочном шкафу согласно технологии приготовления блюд составляет 20...25 мин [6], жарки мясных котлет без предварительного обжаривания на плите – 12...15 мин [5]. Расчет ведем для $\tau = 10$ мин.

Для картофеля расчетное значение числа Фурье составит

$$Fo = \frac{14,4 \cdot 10^{-8} \cdot 600}{0,015^2} = 0,384.$$

Для мясной котлеты расчетное значение числа Фурье составит

$$Fo = \frac{13,0 \cdot 10^{-8} \cdot 600}{0,015^2} = 0,346.$$

Для обоих продуктов $Fo > 0,3$, что свидетельствует о достижении регулярного режима нестационарной теплопроводности и позволяет использовать в расчетах уравнение (6).

При тепловой обработке с поверхности кулинарных изделий происходит испарение влаги. Так как греющей средой является водяной пар, то подсушивание поверхности изделий значительно снизится. Температура на поверхности изделий в течение длительного времени не будет превышать температуру насыщения водяного пара при данном давлении в связи с наличием конденсатной пленки [8]. Поэтому при расчете продолжительности тепловой обработки картофеля и мясных котлет в среде перегретого водяного пара температуру на поверхности принимаем постоянной и равной температуре насыщения конденсирующегося пара.

Таким образом, фиксированная температура $t_{ж}$ будет равной температуре насыщения $t_{н}$. Отсюда

$$\Theta = \frac{t_{н} - t}{t_{н} - t_0}. \quad (7)$$

Постоянная температура на поверхности тела соответствует $Bi \rightarrow \infty$.

Для бесконечного цилиндра при $Bi \rightarrow \infty$ $N(Bi) = 1,606$, $\mu_1 = -5,787$, что позволяет в расчетах использовать следующее уравнение [8]

$$\Theta_0 = 1,606 \exp(-5,787 Fo). \quad (8)$$

При тепловой обработке в среде нагретого воздуха поверхность изделий быстро подсушивается с образованием корки, температура которой переменная и выше температуры насыщения.

Для характеристики изменения теплопередачи от нагретого воздуха к внутренним слоям изделий в связи с ранним подсушиванием внешней оболочки дополнительно введен эквивалентный коэффициент изменения теплоотдачи $\alpha_{\text{ЭКВ}}$.

Объектом моделирования принимаем изделие без корки. Внешняя оболочка (корка) отнесена к окружающей (греющей) среде. Термическое сопротивление запеченной корки отнесено, таким образом, к граничным условиям. Температуру подкоркового слоя принимаем равной температуре насыщения, что обусловлено вскипанием свободной влаги вблизи нагретой корки. Плотность теплового потока от воздуха к поверхности кулинарных изделий принимаем равной плотности теплового потока, передаваемого через корку к внутренним слоям изделий. Фиксированную температуру $t_{\text{ж}}$ принимаем равной температуре греющей среды (200°C). Таким образом

$$\alpha_{\text{ЭКВ}} = \frac{l}{\alpha} + \frac{\delta_R}{\lambda_R}, \quad (9)$$

$$q = \alpha_{\text{ЭКВ}}(t_B - t_H) = \alpha(t_B - t_{\text{ПОВ}}). \quad (10)$$

Отсюда

$$\alpha_{\text{ЭКВ}} = \alpha \times \frac{t_B - t_K}{t_K - t_H}, \quad (11)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 α – коэффициент теплоотдачи от нагретого воздуха, Вт/(м²°C);

t_B – температура нагретого воздуха, °C;

$t_{\text{ПОВ}}$ – температура корки, °C;

t_H – температура подкоркового слоя, °C;

λ – коэффициент теплопроводности корки, Вт/(м °C);

δ – толщина корки, м.

Для расчета продолжительности тепловой обработки картофеля и мясных котлет в среде нагретого воздуха введено эквивалентное число Био

$$Bi_{\text{ЭКВ}} = \frac{\alpha_{\text{ЭКВ}} \cdot r}{\lambda}. \quad (12)$$

Согласно литературным данным, поверхность изделий при тепловой обработке в воздушной среде прогревается до температуры 125...130°C [5]. Получается ряд графических зависимостей (кривых), характеризующих изменение температуры в центре исследуемых изделий при постоянной температуре на поверхности.

Для проверки разработанной методики прогнозного расчета были проведены теоретические и экспериментальные исследования.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований использовались котлеты из натурального говяжьего фарша толщиной 25 мм и картофель толщиной 45 мм.

Расчетные данные, приведенные согласно предлагаемой методики, свидетельствуют о прогнозном достижении кулинарной готовности картофеля и мясных рубленых изделий исследованных размеров при тепловой обработке в среде перегретого водяного пара в пределах 10...11 мин (рис. 1, 2).

Кривая изменения температуры в центре изделий при тепловой обработке в среде нагретого воздуха в реальном технологическом процессе будет переходить с одной расчетной кривой на другую. Результаты расчетов позволяют прогнозировать наступление кулинарной готовности картофеля и мясных рубленых изделий при тепловой обработке в среде нагретого воздуха в пределах 13...24 мин (рис. 1, 2).

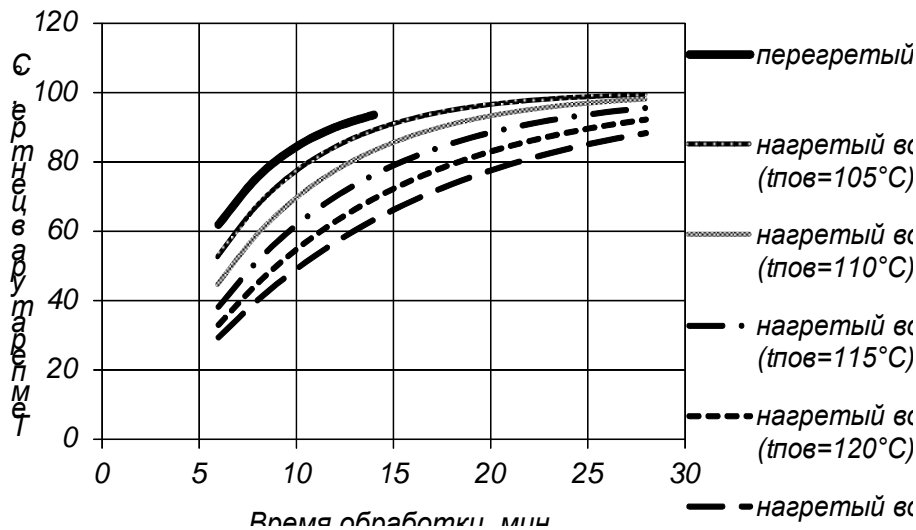


Рис. 1. Результаты прогнозного расчета нагревания центра картофеля

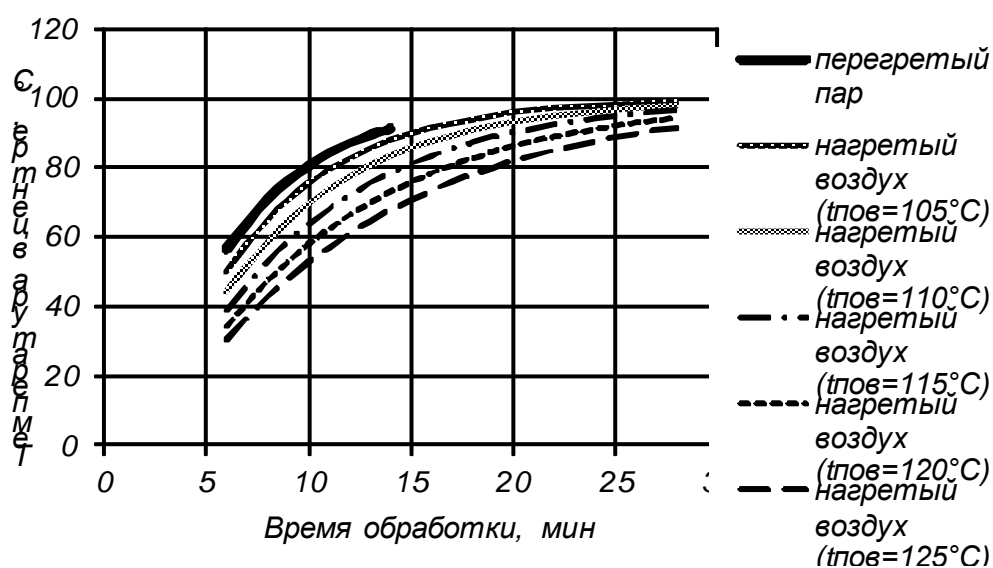


Рис. 2. Результати прогнозного розрахунку нагрівання центра м'ясних рублених котлет

Результати експериментальних досліджень приведені в таблиці 1.

Таблиця 1. – Вплив теплоносіть на продовжителюсть теплової обробки картофеля і м'ясних рублених изделий

Исследуемые продукты	Продолжительность тепловой обработки, мин	
	теплоноситель – перегретый водяной пар	теплоноситель – нагретый воздух
Котлета мясная из натурального фарша	9,5...10,5	13,0...14,5
Картофель очищенный	15,5...16,5	19,0...21,0

Полученные экспериментальные данные, в целом, соответствуют результатам прогнозного расчета, что позволяет использовать прогнозный расчет для проведения теоретических исследований продолжительности нагрівання кулинарных изделий в жарочных и парожарочных шкафах.

Следует обратить внимание на высокую точность результатов прогнозного расчета с экспериментальными данными для м'ясних изделий при теплової обробці в перегретом паре (10...11 мин согласно теоретических исследований и 9,5...10,5 мин согласно экспериментальных исследований). Более значительное различие в результатах исследований для картофеля, очевидно, обусловлено

связыванием свободной влаги при клейстеризации крахмала, что оказывает влияние на теплообменные процессы.

Литература:

1. *Тышкевич С.* Исследование физических свойств мяса [Текст] / С. Тышкевич. – Москва, Пищевая промышленность. – 1992. – 96 с.
2. *Данилов А.М.* Холодильная технология пищевых продуктов [Текст] / А.М. Данилов – Киев, Вища школа. – 1974. – 256 с.
3. *Ball, C.O.* Sterilization in food technology / C.O. Ball, F.C. Olson. – Mc Graw-Hill Book Comp. Inc. New York, Toronto. – 1977. – 144 l.
4. *Ионов А.Г.* Определение конечной температуры в замороженных пищевых продуктах [Текст] / А.Г. Ионов, С.Я. Мекеницкий // Холодильная техника. – Москва. – 1971. - № 11. – С. 28-34.
5. *Баранов В.С.* Технология производства продукции общественного питания: Учебник для студентов, обуч. по спец. 1011 «Технология и орг. общественного питания» [Текст] / В.С. Баранов, А.И. Мглинец, Л.М. Алешина. – Москва, Экономика. – 1986. – 400 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник [Текст] / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев. – Москва, Энергоиздат. – 1982. – 512 с.

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ КУЛІНАРНИХ ВИРОБІВ

Смагін Д.А., Смоляк А.А.

Анотація - у статті приведені результати досліджень по розробці методики прогнозованого розрахунку тривалості теплової обробки кулінарних виробів у середовищі нагрітого повітря й перегрітого повітря та перегрітої водяної пари.

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF EXPECTED CALCULATION OF DURATION OF THERMAL TREATMENT OF CULINARY PRODUCTS

D. Smagin, A. Smolyak

Summary

Results of researches on development of a technique of expected calculation of duration of thermal treatment of culinary products in the environment of heated air and superheated water vapor are given in article.