ISSN 1817-7204(Print)
ISSN 1817-7239(Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ

PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 637.514.5:641.53.094
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-373-384

Поступила в редакцию 18.02.2020
Received 18.02.2020

Д. А. Смагин, А. А. Смоляк, М. Н. Смагина

Могилевский государственный университет продовольствия, Могилев, Беларусь

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАПЕКАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЯСНОГО ФАРША ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ В КОНВЕКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Аннотация: Экономия энергетических ресурсов, оптимизация производственных процессов и обеспечение высокого качество готовой продукции – важные задачи, стоящие перед пищевой промышленностью Республики Беларусь на современном этапе социально-экономического развития. С этой точки зрения актуальным направлением научной деятельности является разработка методик прогнозного определения продолжительности тепловой обработки пищевых продуктов, применение которых позволит повысить уровень планирования производства, рационально осуществлять производственные процессы, обеспечить получение готовой продукции с высокими потребительскими характеристиками без недогрева или перегрева материала обрабатываемых тел, оптимизировать затраты энергетических ресурсов на проведение тепловых процессов. В работе предлагается методика теоретического расчета продолжительности запекания изделий из мясного фарша при прямом контакте греющей среды с обрабатываемым телом в современных конвекционных аппаратах. При разработке теоретического расчета процессы теплообмена разделены на внутренние и внешние. При описании процессов внутреннего теплообмена учтены изменения теплофизических характеристик материала обрабатываемого тела, обусловленные протекающими массообменными процессами и наличием физико-химических изменений структурных элементов с преобразованием сырого фарша в готовый продукт с запеченной коркой. Процессы внешнего теплообмена описаны согласно режимным параметрам современных конвекционных печей, применяемых в малых и средних предприятиях пищевой промышленности и общественном питании. Получены значения продолжительности тепловой обработки на примере изделий из куриного фарша при различных температурах греющей среды. Разработаны специальные стержневые кассеты с конструкцией жесткого крепления термопар, обеспечивающие проведение корректного эксперимента. Отклонения значений продолжительности запекания между теоретически – рассчитанными и полученными экспериментально составляют от 1,49 до 4,44 % для различных температур греющей среды, что свидетельствует о эффективности разработанной методики. Предложенная методика расчета продолжительности процесса запекания изделий из мясного фарша при нагревании позволит оптимизировать производственные процессы, обеспечить экономию энергетических ресурсов и получать готовую продукцию с высокими потребительскими характеристиками. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Качество и эффективность агропромышленного производства»

Ключевые слова: изделия из мясного фарша, запекание, продолжительность тепловой обработки, нестационарная теплопроводность, теплофизические характеристики, вынужденная циркуляция, теплообмен, пароконвектомат

Для цитирования: Смагин, Д. А. Методики расчета продолжительности запекания изделий из мясного фарша при тепловой обработке в конвекционных печах / Д. А. Смагин, А. А. Смоляк, М. Н. Смагина // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2020. – Т. 58, №3. – С. 373–384. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-373-384

© Смагин Д. А., Смоляк А. А., Смагина М. Н., 2020

Denis A. Smagin, Arkadiy A. Smolyak, Marina N. Smagina

Mogilev State University of Food Technologies, Mogilev, Republic of Belarus

METHODS FOR CALCULATING THE DURATION OF BAKING OF MINCED MEAT PRODUCTS DURING HEAT TREATMENT IN CONVECTION OVENS

Abstract: Saving energy resources, optimizing production processes and ensuring high quality of finished products are important tasks facing the food industry of the Republic of Belarus at the present stage of social and economic development. From this point of view, the current direction of scientific activity is development of methods for predicting duration of heat treatment of food products, which will allow to increase the level of production planning, implement production processes rationally, ensure production of finished products with high consumer parameters with no underheating or overheating of material of the processed bodies, and decrease the cost of energy resources for thermal processes. The paper proposes the method for theoretical calculation of baking duration for minced meat products in direct contact of the heating medium with the processed body in modern convection units. When developing a theoretical calculation, heat transfer processes are divided into internal and external. When describing internal heat transfer processes, changes in the thermal and physical characteristics of the material of the processed body are considered, determined by mass transfer processes and physical and chemical changes in structural elements with conversion of raw minced meat into finished product with baked crust. The processes of external heat exchange are described according to the operating parameters of modern convection ovens used in small and medium-sized enterprises of food industry and public catering. The values of duration of heat treatment on the example of products made of chicken mince at different temperatures of the heating medium are obtained. Special rod cassettes with a rigid thermocouple attachment design have been developed to ensure correct experiment. Deviations of baking duration values between the theoretically calculated and experimentally obtained values range from 1.49 to 4.44 % for different temperatures of heating medium, which indicates the efficiency of the developed technique. The proposed technique for calculating the duration of baking process for minced meat products when heated will allow optimizing production processes, saving energy resources and obtaining finished products with high consumer parameters. **Acknowledgments.** The research was carried out as part of the state program of scientific research “Quality and Efficiency of Agroindustrial Production”.

Keywords: minced meat products, baking, duration of heat treatment, non-stationary thermal conductivity, thermal-and-physical parameters, forced circulation, heat exchange, convection steamer

For citation: Smagin D.A., Smolyak A.A., Smagina M.N. Methods for calculating the duration of baking of minced meat products during heat treatment in convection ovens. *Vestsi Natsyyanal’nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series,* 2020, vol. 58, no 3, pp. 373–384 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-373-384

Введение. Технологический процесс производства готовой продукции на предприятиях пищевой промышленности состоит из ряда последовательно выполняемых стадий. Наиболее важным этапом является тепловая обработка, проведение которой определяет качество получаемой продукции в большей степени, чем предваряющие ее операции. При изготовлении мясных изделий термическая обработка является заключительной, формирующей окончательно органолептические и качественные характеристики продукта.

Тепловую обработку можно охарактеризовать как технологический процесс превращения сырья и полуфабрикатов в готовую продукцию путем изменения теплового состояния продуктов и сред, участвующих в процессе; является заключительной фазой переработки сырья, в процессе которой продукт приобретает необходимые потребительские свойства. Физическая сущность поверхностных способов тепловой обработки представляется сложным комплексом взаимосвязанных физико-химических, тепломассообменных, биохимических и других процессов, протекающих в массе продукта при подводе теплоты от поверхностных слоев. Последовательный прогрев слоев продукта сопровождается фазовыми превращениями (испарение свободной влаги), физико-химическими и биохимическими реакциями (денатурация белков, плавление жира), приводящими к значительным изменениям структуры и теплофизических параметров [1, 2].

Важнейшим, но трудно поддающемуся расчету показателю эффективности запекания, является продолжительность процесса. Предлагаемые методики аналитического определения продолжительности выпечки изделий из мясного фарша[1] сложны и нуждаются в корректировке [3, 5]. Отсутствие комплексного подхода по изучению факторов интенсификации тепловой обработки изделий и невозможность прогнозирования ее продолжительности не позволяют рационально осуществлять процесс запекания мясных полуфабрикатов. В итоге продолжительность процесса определяют приблизительно и не учитывают размер, форму изделий и теплофизические

[1] Косой, В. Д. Совершенствование производства колбас : (теоретические основы, процессы, оборудование, технология, рецептуры и контроль качества) / В. Д. Косой, В. П. Дорохов. М.: ДеЛи принт, 2006. 765 с.

характеристики материала, что может привести к недостаточному прогреванию изделий или к их перегреву с соответствующими негативными последствиями.

Интенсивность нагревания и продолжительность тепловой обработки взаимосвязаны и определяются прежде всего величиной теплового потока от греющей среды к центральным слоям продуктов. Продолжительность обработки при этом определяется темпом нагрева в толще изделия, под которым понимают величину, обратную времени, за которую продукт нагрелся бы до заданной температуры, если бы нагревание происходило с постоянной скоростью, равной скорости прогрева в начальный момент.

В инженерных задачах из решения уравнения теплопроводности можно определить основные физические закономерности, влияющие на формирование температурного поля. Однако точно определить температурное поле путем аналитического решения уравнения теплопроводности часто оказывается сложными из-за вариации теплофизических характеристик мясопродуктов, значения температуры среды, геометрических параметров объекта и др.

Получить приближенные решения уравнений теплообмена, которые описывают соответствующие процессы в аналитической форме, и осуществить на основе этих решений расчет конкретных процессов возможно путем подробного анализа особенностей свойств мясопродуктов и характера протекания тепловой обработки. Основой подобных расчетов являются значения теплофизических характеристик (ТФХ), которые и определяют скорость распространения теплоты в мясных фаршах. Наиболее важными ТФХ являются удельная теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность.

Коэффициент температуропроводности является основным показателем, характеризующим интенсивность изменения температуры внутри продукта. Этот показатель служит мерой скорости изменения температуры в нестационарных тепловых процессах и является важнейшей теплоинерционной характеристикой[2].

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром, характеризующим способность тела проводить теплоту или интенсивность процесса теплопроводности в веществе. Значение коэффициента теплопроводности мясопродуктов зависит от их состава, наличия примесей, фазового состояния компонентов (например, оплавлен жир или нет и др.)[3]. Экспериментальные данные показывают, что коэффициент теплопроводности в ряде случаев надо рассматривать как функцию температуры, а следовательно, и пространственных координат, а также времени. Но даже при предположении о простейшем виде зависимости $\lambda = f(t; \vartheta)$ математический аппарат теории теплопроводности становится столь сложным, что получить аналитические решения в большинстве случаев не представляется возможным.

Теплопроводность в отличие от теплоемкости и плотности не является аддитивной функцией, поэтому аддитивных уравнений не существует. При решении задач теплопроводности с достаточной для практических расчетов точностью полагают, что $\lambda = \text{const}$. Расхождения расчетных и экспериментальных данных, которые могут возникнуть в связи с таким допущением, корректируют с помощью эмпирических коэффициентов.

Теплофизические характеристики тесно связаны с химическим составом. При этом в пределах одной товароведческой категории (сорта) химический состав продуктов варьирует в достаточно широких пределах, что вызывает определенное изменение ТФХ мясопродуктов [3, 4]. В связи с этими обстоятельствами при расчете процессов распространения теплоты в мышечной ткани ТФХ могут быть определены с погрешностью 10 ± 5 %. Поэтому при расчете необходимо учитывать химический состав исследуемых образцов. Если под структурой продукта понимать характер связей между его макроэлементами и их расположение относительно друг друга, то заметной связи между теплофизическими характеристиками и структурой продукта нет.

Теплофизические параметры пищевых масс изменяются в зависимости от влажности, содержания жира и температуры тел. Также значительное влияние на интенсивность протекания теплообмена оказывает степень измельченности мясопродуктов. Для цельномышечных

[2] Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы нестационарной теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1978. 328 с.

[3] Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов : справочник. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Пищевая пром-сть, 1980. 288 с.

где t – температура тела в момент времени $\tau > \tau_0$, ° С; $t_ж$ – некоторая фиксированная температура, °С; t_0 – начальная температура тела, °С.

Безразмерная температура тела определяется безразмерной координатой, числом Био и числом Фурье [6], т.е.

$$\Theta = f(\xi; Bi; Fo). \quad (4)$$

Безразмерная координата ξ, согласно [6], равна

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad (5)$$

где x – координата; l – характерный линейный размер, м.

Уравнение, описывающее нестационарное температурное поле в теле, представляет собой сумму бесконечного ряда, члены которого расположены по быстро убывающим экспоненциальным функциям[5], и имеет следующий вид [6]:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} A(\mu_n) U(\mu_n \bar{\xi}) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (6)$$

где A, U – табличные функции; μ_n – корни характеристического уравнения $\mu = \mu(Bi)$.

Специфика геометрической формы учитывается различным видом множителей $A(\mu_n)$ и $U(\mu_n\xi)$. Для тел одной и той же формы различным начальным распределением температуры будут соответствовать разные совокупности чисел $A(\mu_n)$.

При малых значениях V от $V = 0$ до $V = V_1$ распределение температуры внутри тела и скорость изменения во времени температуры в отдельных точках тела зависят от особенностей начального распределения температур. В этих условиях поле температур в теле будет определяться не только первым, но и последующими членами ряда, уравнение (6). Этот первый период нагревания называют неупорядоченной стадией процесса нагревания.

С увеличением времени τ последующие члены ряда (6) будут быстро убывать, т.е. ряд становится быстросходящимся. Начиная с некоторого момента времени $V > V_1$ начальные условия начинают играть второстепенную роль, и процесс полностью определяется только условиями нагревания на границе тела и среды, физическими свойствами тела и его геометрической формой и размерами. Температурное поле описывается первым членом ряда (6):

$$\Theta = A_1 U_1 \exp(-\mu_1 Fo). \quad (7)$$

На расчет числа Био и числа Фурье оказывают влияние теплофизические характеристики материала тела – коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности. Как было показано, данные коэффициенты не поддаются математическому анализу и для них существуют только найденные опытным путем значения, которые значительно различаются для сырого фарша и для готового продукта [11–14].

Коэффициент теплопроводности внутренних слоев изделия изменяется от показателей для сырого фарша в начале обработки до показателей готового продукта к концу обработки, характеризуясь линейной зависимостью от температуры [15]. Для технического расчета значение среднего коэффициента теплопроводности внутренних слоев в процессе преобразования сырого фарша в готовый продукт определяем как среднеарифметическое для граничных значений температуры тела, и это значение принимаем постоянным:

$$\lambda_{\text{внутр}}^{\text{ф-пр}} = \frac{\lambda_{\text{ф}} + \lambda_{\text{пр}}}{2}, \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{внутр}}^{\text{ф-пр}}$ – коэффициент теплопроводности материала тела, учитывающий преобразование сырого фарша в готовый продукт, Вт/(м × °С); $\lambda_{\text{ф}}$ – коэффициент теплопроводности сырого фарша, Вт/(м × °С); $\lambda_{\text{пр}}$ – коэффициент теплопроводности готового продукта, Вт/(м × °С).

Коэффициент теплопроводности поверхности изделия для сырого фарша в начале обработки и для корки к концу обработки значительно изменяются. Принимаем параболический закон

[5] Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы нестационарной теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1978. 328 с.

изменения теплопроводности соответственно параболическому закону изменения температуры поверхности [16] и определяем коэффициент теплопроводности поверхности тела, учитывающий преобразование сырого фарша в корку по такой формуле:

$$\lambda_{\text{пов}}^{\text{ф-к}} = \frac{1}{3}\lambda_{\text{ф}} + \frac{2}{3}\lambda_{\text{к}}, \tag{9}$$

где $\lambda_{\text{пов}}^{\text{ф-к}}$– коэффициент теплопроводности поверхности тела, учитывающий преобразование сырого фарша в корку, Вт/(м×°С); $\lambda_{\text{к}}$ – коэффициент теплопроводности корки (принимаем равным коэффициенту теплопроводности сухого фарша, рассматривая корку как обезвоженный слой), Вт/(м×°С).

Для дальнейшего расчета вводим общий эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий процессы, протекающие при тепловой обработке:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{l}{\frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{пов}}^{\text{ф-к}}} + \frac{l'_{\text{ф-пр}}}{\lambda_{\text{внтр}}^{\text{ф-пр}}}}, \tag{10}$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности изделия, учитывающий процессы, протекающие при тепловой обработке, Вт/(м×°С); l – характерный линейный размер изделия, м; $\delta_{\text{к}}$ – толщина корки, образующейся при запекании изделия из мясного фарша, м; $l'_{\text{ф-пр}}$ – характерный линейный размер изделия по внутреннему слою, м.

Аналогично определяем эквивалентные коэффициенты температуропроводности материала и поверхности изделия, учитывающий процессы, протекающие при тепловой обработке:

$$a_{\text{внутр}}^{\text{ф-пр}} = \frac{a_{\text{ф}} + a_{\text{пр}}}{2}, \tag{11}$$

где $a_{\text{внутр}}^{\text{ф-пр}}$ – коэффициент температуропроводности материала тела, учитывающий преобразование сырого фарша в готовый продукт, м^2/с; $a_{\text{ф}}$ – коэффициент температуропроводности сырого фарша, м^2/с; $a_{\text{пр}}$ – коэффициент температуропроводности готового продукта, м^2/с.

$$a_{\text{пов}}^{\text{ф-к}} = \frac{1}{3}a_{\text{ф}} + \frac{2}{3}a_{\text{к}}, \tag{12}$$

где $a_{\text{пов}}^{\text{ф-к}}$ – коэффициент температуропроводности поверхности тела, учитывающий преобразование сырого фарша в корку, м^2/с; $a_{\text{к}}$ – коэффициент температуропроводности корки (принимаем равным коэффициенту температуропроводности сухого фарша, рассматривая корку как обезвоженный слой), м^2/с.

$$a_{\text{экв}} = \frac{l}{\frac{\delta_{\text{к}}}{a_{\text{пов}}^{\text{ф-к}}} + \frac{l'_{\text{ф-пр}}}{a_{\text{внтр}}^{\text{ф-пр}}}}, \tag{13}$$

где $a_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент температуропроводности изделия, учитывающий процессы, протекающие при тепловой обработке, м^2/с;

С учетом изменения теплофизических характеристик материала при превращении сырого фарша в готовый продукт с измененными структурными элементами, а также учитывая наличие корки с теплофизическими характеристиками, отличными от внутреннего материала, определяем эквивалентное число Био:

$$Bi_{\text{экв}} = \frac{\alpha l}{\lambda_{\text{экв}}}, \tag{14}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2×°С); l – характерный размер изделия, м;

и эквивалентное число Фурье:

$$Fo_{\text{экв}} = \frac{a_{\text{экв}} V}{l^2}. \tag{15}$$

Особенности внешнего теплообмена определяются теплофизическими свойствами и характером движения теплоносителя в рабочей камере.

При расчете процессов внешнего теплообмена используем следующие безразмерные комплексы теории подобия: критерий Рейнольдса *Re*, критерий Нуссельта *Nu*, критерий Прандтля *Pr*.

Расчет проводим для режимных параметров тепловой обработки в современных конвекционных аппаратах [16–19].

Для получения коэффициента теплоотдачи конвекций от теплоносителя при поперечном обтекании изделия из мясного фарша в виде цилиндра применялась теория подобия.

Процесс теплообмена между поверхностью изделия и греющей средой является результатом совместного действия процессов конвективного теплообмена и лучеиспускания. В таких случаях в качестве основного процесса принимается конвективный теплообмен. При этом качественной характеристикой процесса является общий (суммарный) коэффициент теплоотдачи, определяемый по следующей формуле:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л, \tag{16}$$

где $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвекций, Вт/(м$^2 \times$ °С); $\alpha_л$ – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/(м$^2 \times$ °С).

Система определяемых чисел подобия включает в себя искомую величину – коэффициент конвективной теплоотдачи, который содержится в числе Нуссельта:

$$\alpha_к = \frac{Nu\lambda}{l}, \tag{17}$$

В свою очередь, число Нуссельта зависит от числа Рейнольдса и Прандтля:

$$Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}), \tag{18}$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Значение числа Рейдольдса определяется по следующей формуле:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_{ср} l}{\nu}, \tag{19}$$

где l – характерный размер изделия, м; $\omega_{ср}$ – средняя скорость движения теплоносителя в камере аппарата, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости сухого воздуха при его расчетной температуре $t_ж$, м^2/с.

Для расчета числа Нуссельта применяются следующие зависимости [10]:

1) при $10^0 \leqslant \mathrm{Re} < 4 \times 10^1$

$$Nu = 0{,}76\mathrm{Re}^{0{,}4}\mathrm{Pr}^{0{,}37}, \tag{20}$$

2) при $4 \times 10^1 \leqslant \mathrm{Re} < 10^3$

$$Nu = 0{,}52\mathrm{Re}^{0{,}5}\mathrm{Pr}^{0{,}37}, \tag{21}$$

3) при $10^3 \leqslant \mathrm{Re} < 2 \times 10^5$

$$Nu = 0{,}26\mathrm{Re}^{0{,}6}\mathrm{Pr}^{0{,}37}, \tag{22}$$

4) при $2 \times 10^5 \leqslant \mathrm{Re} < 10^7$

$$Nu = 0{,}023\mathrm{Re}^{0{,}8}\mathrm{Pr}^{0{,}4}, \tag{23}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяли по такой формуле:

$$\alpha_л = \frac{\varepsilon C_0}{t_ж - t_п}\left[\left(\frac{T_ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_п}{100}\right)^4\right], \tag{24}$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты; $T_ж$ и $T_п$ – абсолютная температура теплоносителя и средняя температура поверхности изделия соответственно, К; $t_ж$ и $t_п$ – средняя температура теплоносителя и поверхности изделия соответственно, °С.

Таблица 1. **Расчет конвективного коэффициента теплоотдачи**

Table 1. **Calculation of convective heat transfer coefficient**

$t_ж$, °C	d, м	ω, м/с	$\nu, \times 10^{-5}$, м²/с [6]	λ, Вт/(м×°C) [6]	Pr [6]	Re	Nu	$\alpha_к$, Вт/(м²×°C)
150	0,06	3,9	2,895	0,03565	0,683	8082,9	49,92	29,66
160	0,06	3,9	3,009	0,0364	0,682	7776,67	48,75	29,57
180	0,06	3,9	3,249	0,0378	0,681	7202,22	46,53	29,31
200	0,06	3,9	3,485	0,0393	0,68	6714,49	44,59	29,20
220	0,06	3,9	3,773	0,041	0,6785	6201,96	42,48	29,03

Расчет продолжительности нагревания изделий из мясного фарша выполним для рекомендуемых значений температур. Принимаем, что запеканию подвергается изделие из куриного фарша в виде цилиндра диаметром d = 6 см в конвекционном аппарате с вынужденным движением теплоносителя со средней скоростью движения ω = 3,9 м/с. Обтекание изделия теплоносителем происходит поперечно. Расчет коэффициента теплоотдачи от горячего воздуха представлен в табл. 1.

Таблица 2. **Расчет коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием**

Table 2. **Calculation of heat transfer coefficient by radiation**

$t_ж$, °C	ε [7]	C_0 [13]	$t_с$, °C	$T_с$, K	$T_ж$, K	$\alpha_л$, Вт/(м²×°C)
150	0,5	5,67	80	353	423	6,68
160	0,5	5,67	80	353	433	6,95
180	0,5	5,67	80	353	453	7,54
200	0,5	5,67	80	353	473	8,16
220	0,5	5,67	80	353	493	8,82

Таблица 3. **Расчет общего коэффициента теплоотдачи от греющей среды и эквивалентного числа Био**

Table 3. **Calculation of the total heat transfer coefficient from the heating medium and equivalent Bio number**

$t_ж$, °C	$\alpha_к$, Вт/(м²×°C)	$\alpha_л$, Вт/(м²×°C)	α, Вт/(м²×°C)	$Bi_{экв}$
150	29,66	6,68	36,34	2,52
160	29,57	6,95	36,52	2,54
180	29,31	7,54	36,85	2,56
200	29,20	8,16	37,36	2,59
220	29,03	8,82	37,85	2,63

Таблица 4. **Расчет времени, за которое температура в центре изделия достигнет 85 °C**

Table 4. **Calculation of time for the temperature to reach 85 °C in the center of the product**

$t_ж$, °C	$a_{экв} \times 10^{-8}$, м²/с	$Bi_{экв}$	$\Theta_ц$	N(Bi)	μ^2	τ, мин
150	13,87	2,52	0,481	1,386	2,921	39,18
160	13,87	2,54	0,517	1,387	2,928	36,45
180	13,87	2,56	0,576	1,389	2,943	32,35
200	13,87	2,59	0,622	1,391	2,966	29,35
220	13,87	2,63	0,659	1,394	2,987	27,13

Принимаем, что средняя температура поверхности мясного изделия при запекании составляет 80 °C. Расчет коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием представлен в табл. 2.

Расчет общего коэффициента теплоотдачи от горячего воздуха и эквивалентного числа Био представлен в табл. 3.

Определим время, за которое исследуемое изделие из куриного фарша достигнет температуры кулинарной готовности, т.е. $t_ц$ = 85 °C, при нагревании изделия из куриного фарша цилиндрической формы d = 0,06 м с начальной температурой t_0 = 15 °C. Тепловая обработка осуществляется в среде горячего воздуха при $t_ж$ = 180 °C.

Из критериального уравнения изменения безразмерной температуры в центре изделий цилиндрической формы выражаем время, за которое изделие из мясного фарша достигнет температуры кулинарной готовности

$$\tau = \frac{r^2}{-\mu^2 a_{экв}} \ln \frac{\Theta_ц}{N(Bi)}, \qquad (25)$$

Значения $N(Bi)$ и μ^2 определяем по табличным данным[6]. Расчеты времени приготовления изделия при температуре греющей среды 150, 160, 200 и 220 °C представлены в табл. 4.

Экспериментальная часть. Адекватность разработанной методики проверяли экспериментально. Исследования проводили на лабораторной базе кафедры машин и аппаратов пищевых производств и кафедры теплохладотехники Могилёвского государственного университета продовольствия для образцов из куриного фар-

[6] Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент : справочник / Е. В. Аметистов [и др.] ; под общ. ред.: Е. А. Григорьева, В. М. Зорина. М. : Энергоиздат, 1982. 510 с.

ша аналогичных по составу применяемых в теоретическом расчете, помещенных в стержневые цилиндрические кассеты при прямом контакте греющей среды и поверхности изделия. При проведении эксперимента фарш помещали в однослойный марлевый мешок, сшитый в виде цилиндра, размером 57 × 300 мм. Использовали марлю медицинскую по ТУ BY 390287860.004–2011 с размерами ячеек 2 × 1 мм при плотности ткани 35 г/м^2. При набивании фаршем марля натягивалась, размеры ячеек увеличивались и превышали исходные. В получаемом таким образом изделии мясной фарш напрямую контактирует с греющей средой, так как ячейки марли очень крупные по отношению к нитям. Мешок помещали в специальную кассету, представляющую собой сварную каркасную конструкцию из тонких металлических колец, соединенных с двух сторон стержнями. Внутренние размеры кассеты 57 × 300 мм, образуемые сплошным основанием, четырьмя кольцами сечением 2,5 мм и соединенные двумя стержнями сечением 4 мм. Металлические кольца и стержни занимают менее 3 % площади кассеты и не оказывают заметного влияния на процесс нагревания заготовки. Отношение диаметра к длине кассеты превышает кратность 5. Проведенные расчеты показывают, что при таком соотношении нагревание со стороны торцов практически не будет оказывать влияния на нагревание центральных слоев. При этом радиус изделия (28–29 мм) позволяет прогревать изделие достаточно длительный период для получения корректных данных.

На рис. 1 показан подготовленный к экспериментальным исследованиям цилиндрический образец из мясного фарша.

Вертикальное размещение цилиндрической заготовки ($\beta = 90°$) характеризуется минимальной неравномерностью теплоотдачи по периметру изделия по сравнению с другими углами атаки и позволяет корректный теплотехнический эксперимент.

Экспериментальные исследований заключались в измерении температуры в центре изделия. Нагревание осуществляли методом конвективной тепловой обработке в среде нагретого воздуха при температуре греющей среды 150, 160, 200 и 220 °С до достижения в центре изделия температуры кулинарной готовности, равной 85 °С.

Для измерения температуры использовали преобразователи термоэлектрические (термопары) ТХА(К)–1199/52/2/1500/0,5 с диаметром термоэлектродов 0,5 мм в кремнеземной оплетке (по ГОСТ 8.338–2002). Термопары крепились к специальной конструкции жесткой фиксации, обеспечивающей точность установки и исключающей сбивание головки. Зафиксированные

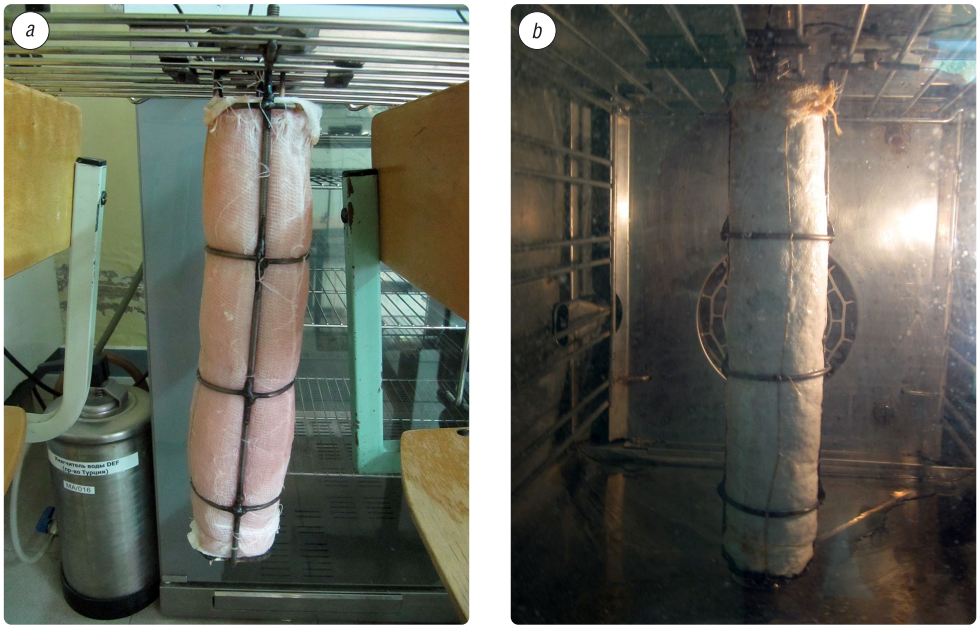

Рис. 1. Цилиндрический образец в ходе проведения экспериментальных исследований: *a* – образец перед помещением в рабочую камеру аппарата; *b* – образец внутри рабочей камеры аппарата

Fig. 1. Cylindrical sample during experimental research: *a* – sample before placing in operating chamber of the device; *b* – sample inside the operating chamber of the device

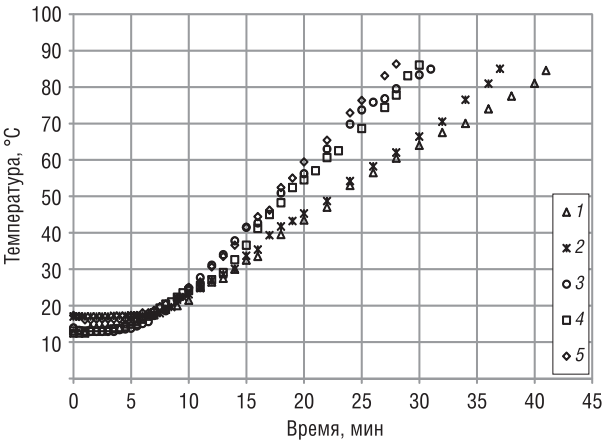

Рис. 2. Изменение температурного поля центра изделий из мясного фарша при температуре греющей среды: *1* – 150 °С; *2* – 160 °С; *3* – 180 °С; *4* – 200 °С; *5* – 220 °С

Fig. 2. Temperature field variation in the center of minced meat products at the following temperature of heating medium: *1* – 150 °С; *2* – 160 °С; *3* – 180 °С; *4* – 200 °С; *5* – 220 °С

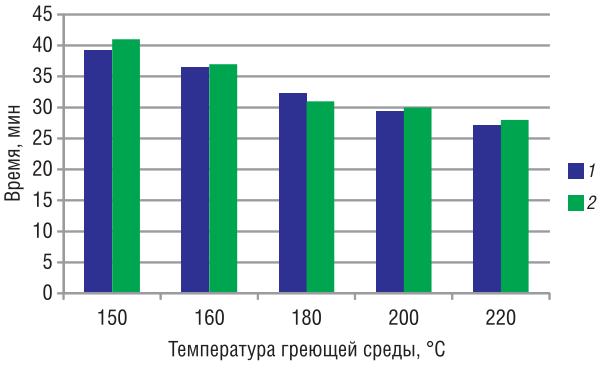

Рис. 3. Влияние температуры греющей среды на продолжительность тепловой обработки изделий из мясного фарша: *1* – продолжительность запекания согласно теоретическому расчету; *2* – продолжительность запекания согласно экспериментальных данных

Fig. 3. Effect of the heating medium temperature on duration of heat treatment of minced meat products: *1*– baking duration according to theoretical calculation; *2* – baking duration according to experimental data

термопары сквозь решетку вводили в открытый торец изделия, термопары проникали внутрь изделия на расстояние, равное половине длины образца. В качестве измерительного прибора использовался измеритель-регулятор «Сосна-002».

Нагревание осуществлялось в рабочей камере конвекционного аппарата Unox-203G (Италия). Данный аппарат является типичным представителем конвекционных печей нового поколения и полученные результаты исследований могут распространяться на всю номенклатуру современных жарочно-пекарных аппаратов с вынужденной циркуляцией греющей среды. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2.

Сравнительная оценка расчетного и экспериментального времени приготовления изделий из мясного фарша (на примере куриного фарша) представлена на рис. 3. Исследования показали, что отклонения значений времени запекания между теоретически рассчитанным и полученными экспериментально при температуре греющей среды 150 °С составляют 4,44 %, при 160 °С – 1,49 %, при 180 °С – 4,35 %, при 200 °С – 2,17 %, при 220 °С – 3,11 %. Таким образом, в работе предложена схема экспериментальной установки на базе конвекционного аппарата с оригинальным измерительным комплексом, позволяющим проводить исследование теплообмена для цилиндрических тел при прямом контакте с греющей средой с жесткой фиксацией точек определения температуры и исключения влияния нагревания торцов. Опеделено, что отклонение расчетных данных теоретической части по сравнению с фактическими экспериментальными данными при разных температурах составляют от 1,49 до 4,44 %, не превышая погрешности в 5 %. Следовательно, предложенная методика расчета продолжительности процесса запекания изделий из мясного фарша в целом адекватно описывает процесс.

Заключение. Для теоретического описания процессы теплообмена при запекании изделий из мясного фарша предложено разделить на внутренние (протекающие в материале вырабатываемых изделий) и внешние (протекающие в рабочей камере аппарата). При проведении расчетов процессов внутреннего теплообмена предложена методика, учитывающая изменение теплофизических характеристик материала при превращении сырого фарша в готовый продукт с измененными структурными элементами, а также образование корки с теплофизическими характеристиками, отличными от внутреннего материала. Полученные эквивалентные значения теплофизических характеристик применялись для определения эквивалентных безразмерных комплексов теории подобия: эквивалентного числа Фурье Fo и эквивалентного числа Био Bi. При математическом описании процессов внешнего теплообмена использовались безразмерные комплексы теории подобия, учитывающие теплофизическими свойства и характер движения теплоносителя в рабочей камере. На основании полученных расчетных значений проведено мате-

матическое описание нестационарного температурного поля в центре обрабатываемых изделий и определены теоретические значения продолжительности тепловой обработки на примере изделий из куриного фарша при различных температурах греющей среды.

Для оценки адекватности предлагаемой методики проведены экспериментальные исследования для образцов из куриного фарша аналогичных по составу применяемых в теоретическом расчете, помещенных в специальные стержневые цилиндрические кассеты, обеспечивающие прямой контакт греющей среды и поверхности изделия. Отклонения значений продолжительности запекания между теоретически-рассчитанными и полученными экспериментально составляют менее 5 % для различных температур греющей среды, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

Полученные научные данные являются основой для математического описания процессов нагревания изделий из мясного фарша в условиях вынужденной циркуляции греющей среды с учетом изменения теплофизических характеристик мясного фарша при его тепловой обработке.

Применение предлагаемой методики расчета продолжительности запекания изделий из мясного фарша при тепловой обработке в конвекционных печах позволяет обеспечить возможность повышения потребительских характеристик готовой продукции, снижения удельных затрат энергетических ресурсов, усовершенствовать процесс оперативного производственного планирования, обеспечить устойчивую ритмичность и контролируемость производства, оптимизировать составление рациональных графиков выпуска продукции.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Качество и эффективность агропромышленного производства», 3.75 «Исследования и оптимизация процесса запекания изделий из мясного фарша в паровоздушных средах».

Список использованных источников

1. *Фейнер, Г.* Мясные продукты: научные основы, технологии, практические рекомендации / Г. Фейнер ; пер. с англ. Н. В. Магды. – СПб. : Профессия, 2010. – 719 с. https://doi.org/10.1533/9781845691721

2. *Рогов, И. А.* Технология мяса и мясных продуктов : учебник / И. А. Рогов, А. Г. Забашта, Г. П. Казюлин. – М.: КолосС, 2009. – Кн. 2 : Технология мясных продуктов. – 710 с.

3. *Пелеев, А. И.* Тепловое оборудование колбасного производства / А. И. Пелеев, А. М. Бражников, В. А. Гаврилова. – М. : Пищевая пром-сть, 1970. – 384 с.

4. *Бражников, А. М.* Теория термической обработки мясопродуктов / А. М. Бражников. – М.: Агропромиздат, 1987. – 271 с.

5. *Тышкевич, А. С.* Исследование физических свойств мяса / А. С. Тышкевич ; пер. с пол. Т. С. Клоссовского ; под ред. А. А. Соколова. – М. : Пищевая пром-сть, 1972. – 96 с.

6. *Липатов, Н. Н.* Процессы и аппараты пищевых производств / Н. Н. Липатов. – М. : Экономика, 1987. – 272 с.

7. *Кэйс, В. М.* Конвективный тепло- и массообмен / В. М. Кэйс ; пер. с англ. И. Н. Дулькина. – М. : Энергия, 1972. – 446 с.

8. Математическое моделирование процессов нагрева и охлаждения колбасных изделий / А. В. Жучков [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий. – 2013. – № 4 (58). – С. 100–105.

9. *Вороненко, Б. А.* Аналитическое решение задачи тепломассопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке / Б. А. Вороненко, В. В. Пеленко, В. В. Стариков // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. – 2009. – № 4 (310). – С. 102–104.

10. *Жукаускас, А. А.* Конвективный перенос в теплообменниках / А. А. Жукаускас. – М. : Наука, 1982. – 472 с.

11. *Jihan, F.* Modeling heat transfer during cooling of ready-to-eat meat and poultry products using three-dimensional finite element analysis and web-based simulation : Ph.D. Thesis / F. Jihan. – Nebraska, 2010. – 231 p.

12. *Kondjoyan, A.* Comparison of calculated and experimental heat transfer coefficients at the surface of circular cylinders placed in a turbulent cross-flow of air / A. Kondjoyan, H. C. Boisson // J. of Food Engineering. – 2005. – Vol. 34, № 2. – P. 123–143. https://doi.org/10.1016/s0260-8774(97)00103-9

13. *Elansari, A.* Effect of temperature and moisture content on thermal conductivity of four types of meat / A. Elansari, A. Hobani // Intern. J. of Food Properties. – 2002. – Vol. 12, № 2. – P. 308–315. https://doi.org/10.1080/10942910701687519

14. *Горбатов, В. М.* Совершенствование тепловой обработки мясных продуктов / В. М. Горбатов, С. А. Александров, Л. А. Цария // Мяс. индустрия СССР. – 1986. - № 7. – С. 28–29.

15. Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производств / А. А. Михелев [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – 326 с.

16. *Кирик, И.* М Экспериментальное исследование процесса тепловой обработки тестовых заготовок в пароконвектомате / И. М. Кирик, А. В. Кирик // Пр. Тавр. держ. агротехнол. ун-ту. – 2012. – Вип. 12, т. 2. – С. 189–202.

17. *Коршунов, Н. П.* Тепловые процессы в жарочных и пекарных шкафах предприятий общественного питания : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.18.12 / Н. П. Коршунов. – М., 1982. – 25 с.

18. *Вазагов, В.М.* Разработка и обоснование технологии жаренья крупнокусковых мясных полуфабрикатов на предприятиях общественного питания : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.18.16 / В.М. Вазагов ; Моск. ин-т нар. хоз-ва им. Г.В. Плеханова. – М., 1977. – 24 с.

19. *Давыдов, Д.М.* Разработка режимов и аппаратов для размораживания и разогрева кулинарных изделий при конвективном теплообмене : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.18.12 / Д.М. Давыдов ; Рос. экон. акад. им. Г.В. Плеханова. – Москва, 2005. – 21 с.

References

1. Feiner G. *Meat products handbook: practical science and thechnology*. Cambridge, Woodhead Publishers, 2006. 719 p. https://doi.org/10.1533/9781845691721

2. Rogov I. A., Zabashta A. G., Kazyulin G. P. *Technology of meat and meat products. Book 2. Technology of meat products*. Moscow, KolosS Publ., 2009. 710 p. (in Russian).

3. Peleev A. I., Brazhnikov A. M., Gavrilova V. A. *Heating equipment for sausage production*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1970. 384 p. (in Russian).

4. Brazhnikov A. M. *Theory of heat treatment of meat products*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 271 p. (in Russian).

5. Tyszkiewicz S. *Badanie fizycznych właściwości mięsa* [Study of physical properties of meat]. Warszawa, WNT, 1969. 110 p. (in Polish).

6. Lipatov N. N. *Processes and apparatuses of food production*. Moscow, Ekonomika Publ., 1987. 272 p. (in Russian).

7. Kays W. M. *Convective heat and mass transfer*. New York, McGraw-Hill, 1966. 387 p.

8. Zhuchkov A. V., Ryazanov A. N., Urazov D. Yu., Shitov V. V. Mathematical modeling of heating and cooling of sausages. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2013, no. 4 (58), pp. 100-105 (in Russian).

9. Voronenko B. A., Pelenko V. V., Starikov V. V. Analytical task solution heat-mass carry in sausage items at their thermal processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya = News of Institutes of Higher Education. Food Technology*, 2009, no. 4 (310), pp. 102-104 (in Russian).

10. Zhukauskas, A. A. *Convective transport in heat exchangers*. Moscow, Nauka Publ, 1982. 472 p. (in Russian).

11. Jihan F. *Modeling heat transfer during cooling of ready-to-eat meat and poultry products using three-dimensional finite element analysis and web-based simulation*. Ph.D. Thesis. Nebraska, 2010. 231 p.

12. Kondjoyan A., Boisson H. C. Comparison of calculated and experimental heat transfer coefficients at the surface of circular cylinders placed in a turbulent cross-flow of air. *Journal of Food Engineering*, 2005, vol. 34, no. 2, pp. 123-143. https://doi.org/10.1016/s0260-8774(97)00103-9

13. Elansari A., Hobani A. Effect of temperature and moisture content on thermal conductivity of four types of meat. *International Journal of Food Properties*, 2002, vol. 12, no. 2, pp. 308-315. https://doi.org/10.1080/10942910701687519

14. Gorbatov V. M., Aleksandrov S. A., Tsariya L. A. Improving the heat treatment of meat products. *Myasnaya industriya SSSR* [Meat Industry of the USSR], 1986, no. 7, pp. 28-29 (in Russian).

15. Mikhelev A. A., Itskovich N. M., Sigal M. N., Volodarskii A. V. *Calculation and design of ovens for bakery and confectionery industries*. 3nd ed. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1979. 326 p. (in Russian).

16. Kirik I. M., Kirik A. V. Experimental investigation of the dough thermal processing in the steam convection apparatus. *Pratsi Tavriis'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu = Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*, 2012, iss. 12, vol. 2, pp. 189-202 (in Russian).

17. Korshunov N. P. *Thermal processes in frying and baking cabinets of public catering enterprises.* Abstract of Ph.D. diss. Moscow, 1982. 25 p. (in Russian).

18. Vazagov V. M. *Development and justification of roasting technology of large-sized semi-finished meat products at public catering enterprises.* Abstract of Ph.D. diss. Moscow, 1977. 24 p. (in Russian).

19. Davydov D. M. *Development of modes and apparatuses for defrosting and heating culinary products with convective heat exchange.* Abstract of Ph.D. diss. Moscow, 2005. 21 p. (in Russian).

Информация об авторах

Смагин Денис Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь). E-mail: denis_smagin@mail.ru

Смоляк Аркадий Арсентьевич – кандидат технических наук, доцент, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь).

Смагина Марина Николаевна – аспирант, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь). E-mail: m-a-r-i-s-h-a88@mail.ru

Information about authors

Denis A. Smagin - Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. Mogilev State University of Food Technologies (3 Schmidt Ave., 212027 Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: denis_smagin@mail.ru

Arkadiy A. *Smolyak* - Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. Mogilev State University of Food Technologies (3 Schmidt Ave., 212027 Mogilev, Republic of Belarus).

Marina N. Smagina - Postgraduate Student. Mogilev State University of Food Technologies (3 Schmidt Ave., 212027 Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: m-a-r-i-s-h-a88@mail.ru