

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>
УДК 536.2:637.5



Оригинальная статья

М. Н. Смагина*, Д. А. Смагин

*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,
пр. Шмидта, 3, 212027, Могилев, Республика Беларусь*

**ТЕПЛООБМЕН ВО ВЛАЖНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ
РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА ПРИ КОНВЕКТИВНОМ НАГРЕВАНИИ
В ПАРОВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ**

Аннотация. Приведены результаты исследования процесса нагревания влажных капиллярно-пористых тел различного состава (мясных изделий) при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси в условиях вынужденной циркуляции греющей среды. Исследования проводились на влажном обезжиренном образце (мясо куриного филе) и маловлажном жирном образце (лопаточная часть свинины), сформованных в виде цилиндра и пластины. Показано, что процесс нагревания мясных изделий различного состава подчиняется закономерностям теории нестационарной теплопроводности однородных тел, несмотря на многообразие сопутствующих фазовых и физико-химических преобразований. Установлено, что регулярный режим нестационарной теплопроводности наступает при $Fo \geq 0,2$ для всех исследуемых вариантов. На основании обработки и анализа экспериментальных данных получены критериальные уравнения вида $\Theta = f(Fo, Bi)$ для центрального слоя исследуемых изделий в диапазоне температур 160–240 °С. Установлено, что особенности нагревания мясных изделий в среде паровоздушной смеси приводят к меньшим значениям коэффициентов μ_1 и $N(Bi)$ при регулярном режиме по сравнению с нагреванием в сухом воздухе. При этом для маловлажных жирных образцов характерны более низкие значения μ_1 и $N(Bi)$ по сравнению с влажными обезжиренными. В результате сравнения с табличными данными для твердых тел показано, что экспериментальные коэффициенты μ_1 и $N(Bi)$ характеризуются меньшими значениями для всех исследуемых вариантов. Установлено, что характер изменения $N(Bi)$ и μ_1 для твердых тел и изучаемых изделий противоположен, то есть при росте числа Bi для твердых тел характерно увеличение $N(Bi)$ и μ_1 , в то время как для исследуемых изделий характерно их уменьшение. Практическая значимость исследований состоит в повышении качественных характеристик мясных рубленых изделий и оптимизации оперативного производственного планирования за счет применения методики прогнозного расчета продолжительности тепловых операций.

Ключевые слова: теплообмен, сухой воздух, паровоздушная смесь, влажное тело, нестационарная теплопроводность, регулярный режим, безразмерная температура, число Био, число Фурье

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Смагина Марина Николаевна* – магистр технических наук, специалист по работе с магистрантами, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: m.n.smagina@mail.ru; Смагин Денис Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: denis_smagin@mail.ru

Вклад авторов: Смагина Марина Николаевна – сбор данных литературы, планирование исследования, сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, написание и оформление текста рукописи; Смагин Денис Алексеевич – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, обобщение результатов исследования, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Смагина, М. Н. Теплообмен во влажных капиллярно-пористых телах различного состава при конвективном нагревании в паровоздушных средах / М. Н. Смагина, Д. А. Смагин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 137–148. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>

Поступила в редакцию: 01.03.2023

Утверждена к печати 25.05.2023

© Смагина М. Н., Смагин Д. А., 2023

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Marina N. Smagina*, Denis A. Smagin

*Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, 3, Schmidt Ave., 212027, Mogilev, Republic of Belarus***HEAT EXCHANGE IN WET CAPILLARY-POROUS BODIES OF VARIOUS COMPOSITIONS DURING CONVECTIVE HEATING IN VAPOR-AIR MEDIA**

Abstract. The results of the study of the heating process of wet capillary-porous bodies of various compositions (meat products) during heat treatment in dry air and steam-air mixture under conditions of forced circulation of the heating medium are presented. The studies were carried out on a moist fat-free sample (chicken fillet meat) and a low-moisture fat sample (pork shoulder blade) formed in the form of a cylinder and a plate. It is shown that the process of heating of meat products of various compositions obeys the laws of the theory of unsteady thermal conductivity of homogeneous bodies, despite the variety of accompanying phase and physico-chemical transformations. It is established that the regular mode of non-stationary thermal conductivity occurs at $Fo \geq 0.2$ for all the studied variants. Based on the processing and analysis of experimental data, criterion equations of the form $\Theta = f(Fo, Bi)$ for the central layer of the studied products in the temperature range 160–240 °C were obtained. It has been established that the peculiarities of heating of meat products in a vapor-air mixture environment lead to lower values of the coefficients μ_1 and $N(Bi)$ at regular operation compared with heating in dry air. It was found that low-moisture fatty samples are characterized by lower values of μ_1 and $N(Bi)$ in comparison with moist fat-free ones. As a result of comparison with tabular data for solids, it is shown that the experimental coefficients μ_1 and $N(Bi)$ are characterized by lower values for all the studied variants. It is established that the nature of the change in $N(Bi)$ and μ_1 for solids and the studied products is opposite, i.e., with an increase in the number of Bi, an increase in $N(Bi)$ and μ_1 is characteristic for solids, while their decrease is characteristic for the studied products. The practical significance of the research consists in improving the quality characteristics of minced meat products and optimizing operational production planning through the use of the methodology of predictive calculation of the duration of thermal operations.

Keywords: heat exchange, dry air, steam-air mixture, wet body, non-stationary thermal conductivity, regular mode, dimensionless temperature, the Bio criterion, the Fourier criterion

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: Marina N. Smagina* – Master of Sci. (Engineering), Specialist in Working with Undergraduates, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: m.n.smagina@mail.ru; Denis A. Smagin – Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: denis_smagin@mail.ru

Contribution of the authors: Marina N. Smagina – literature data collection, research planning, data collection and systematization, comparative analysis, formulation of conclusions, writing and formatting of the text of the manuscript; Denis A. Smagin – substantiation of the concept, design development of experimental research, generalization of research results, editing of the text of the manuscript.

For citation: Smagina M. N., Smagin D. A. Heat exchange in wet capillary-porous bodies of various compositions during convective heating in vapor-air media. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 137–148 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>

Received: 01.03.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. Тепловая обработка пищевых продуктов представляет собой процесс, включающий в себя сложный комплекс тесно взаимосвязанных теплообменных, массообменных и физико-химических изменений.

Мясопродукты имеют биологическое происхождение, что обуславливает определенный характер распространения теплоты при их нагревании. Данные изделия классифицируются как влажные тела со сложным внутренним строением и разнородным химическим составом. Базовыми составными элементами (свыше 98 % от массы) являются вода, белок и жир, которые подвергаются основным изменениям при нагревании. Белки с ростом температуры коагулируют, жиры – расплавляются, для чего требуются определенные затраты теплоты на изменение конформационных структур. Существенным изменениям подвергаются и другие составные вещества: распадаются термолабильные соединения, дезактивируются ферменты, преобразуются углеводы, видоизменяются экстрактивные вещества, оказывается угнетающее воздействие на микрофлору и т.д. Указанные процессы протекают пусть и с незначительными, но дополняющими основной процесс затратами теплоты. В ходе роста температуры в мясном сырье происходят сложные фазовые превращения (интенсивное испарение влаги на поверхности с высушиванием и последующим образованием корки; массоперенос во внутренних слоях капиллярно-пористого материала с клеточными перегородками и жировыми прокладками и пр.). В результате опи-

санных превращений значительным преобразованиям подвергается и реологическая структура материала, изменяясь от вязко-пластичной для сырого фарша до упруго-эластично-пластичной для готового продукта; поверхностные слои превращаются в практически сухое вещество [1, 2].

Из решения уравнения теплопроводности можно найти основные физические закономерности, влияющие на формирование температурного поля. Однако точно определить температурное поле мясopодуктов путем аналитического решения уравнения теплопроводности сложно из-за вариации большого количества разнообразных факторов.

Теплофизические характеристики (ТФХ) исходного сырья значительно колеблются в зависимости от количественного содержания нутриентов. Увеличение влагосодержания приводит к росту коэффициентов тепло- и температуропроводности, а увеличение содержания жира – к их снижению. Влияние содержания белка на ТФХ досконально не изучено [3].

Тепловые эффекты фазовых и физико-химических преобразований обуславливают сложные закономерности в температурных изменениях ТФХ мясopодуктов. Теплоемкость мясного сырья при нагревании вначале снижается, затем повышается. Коэффициент теплопроводности при росте температуры увеличивается, но с различной интенсивностью и даже снижением на отдельных температурных участках. Плотность мясopодуктов с повышением температуры уменьшается. При этом характер данных изменений значительно варьируется для мясных фаршей разного состава. Температурные колебания ТФХ мясного сырья зависят от влажности и жирности исходного сырья. Коэффициент температуропроводности как переменная, зависящая от плотности, теплопроводности и теплоемкости, изменяется по сложным законам [1, 4–6].

Внедрение в производственную практику способов термообработки в паровоздушных средах различной влажности в условиях вынужденной циркуляции теплоносителя вносит разнообразие в протекание процесса. При нагревании в среде сухого воздуха на поверхности обрабатываемых изделий создаются постоянные во времени тепловые потоки. При использовании паровоздушной смеси (чистый перегретый водяной пар не применяется из-за необходимости герметизации рабочих камер) процесс теплообмена сложнее. На начальном этапе при температуре поверхности ниже температуры насыщения водяного пара происходит конденсация пара. По мере роста температуры отдельные участки продукта перегреваются, и локальные температуры различаются в зависимости от ориентации поверхности. Коэффициент теплоотдачи уменьшается, но остается выше, чем при свободной конвекции. При дальнейшем нагревании температура поверхности превышает температуру насыщения пара, конденсация прекращается. Теплоотдача осуществляется за счет конвективного теплообмена.

Процессы нагревания при температурах выше температуры насыщения водяного пара (технологические операции жарки и запекания) детально не изучены. Так, в [7–17] приведены методики математического описания процессов нагревания рубленых мясных изделий для процессов запекания. Однако в данных работах применялись тела ограниченных размеров; не изучались вопросы особенностей нагревания изделий различных форм и химического состава, применения различных теплоносителей. Математическая обработка полученных результатов проводилась без применения теории регулярного режима нестационарной теплопроводности, что усложняло получаемую методику. Также не осуществлялось и сравнение итоговых данных с существующими расчетными коэффициентами для твердых тел.

Поэтому актуальной задачей является получение математических зависимостей, описывающих процесс конвективного нагревания изделий из мясного измельченного сырья одномерных форм различного химического состава в среде сухого воздуха и паровоздушной смеси при прямом контакте продукта с греющей средой.

Постановка задачи. С точки зрения теплотехники нагревание мясopодуктов представляет собой процесс переноса теплоты за счет теплопроводности, когда температура системы изменяется не только от точки к точке, но и с течением времени. Таким образом, рассматриваемые процессы являются нестационарными, и для их описания может быть применена теория нестационарной теплопроводности.

Уравнение теплопроводности в безразмерной форме для одномерной задачи имеет вид

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2}, \quad (1)$$

где Θ – безразмерная температура тела; Fo – число Фурье; ξ – безразмерная координата.

Безразмерная температура характеризует процесс нагревания однородных тел:

$$\Theta = \frac{t_{\text{ж}} - t}{t_{\text{ж}} - t_0} \quad (2)$$

($t_{\text{ж}}$ – фиксированная температура, °С; t_0 – температура тела в начальный момент времени, °С; t – температура тела в момент времени $\tau > \tau_0$, °С), и определяется безразмерной координатой, числом Био и числом Фурье:

$$\Theta = f(\xi; Bi; Fo). \quad (3)$$

Граничные условия для исследуемого процесса при регулярном режиме могут быть заданы в виде условий третьего рода. Для одномерных тел на центральной оси одномерного цилиндра и по центру одномерной пластины изменение во времени безразмерной температуры в данном случае описывается уравнением

$$\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}, \quad (4)$$

где $N(Bi)$ и μ_1^2 – корни характеристического уравнения.

Методы и объекты исследований. По химическому составу образцы разделялись на две группы: влажный обезжиренный и маловлажный жирный. В качестве первого образца применялось измельченное мясо куриного филе без кожи (белок – 23,6 %, жир – 1,9 %, вода – 73,5 %); в качестве второго – мясо лопаточной части свинины (белок – 14,7 %, жир – 29,4 %, вода – 55,1 %) [2, 18].

Сырье подвергалось измельчению на мясорубке с диаметром отверстий выходной решетки 2,5 мм. От применения цельномышечных полуфабрикатов отказались в связи с эффектом анизотропии теплопроводности, которая проявляется в том, что по различным направлениям (вдоль или поперек мышечных волокон, через слой жировой или соединительной ткани) величина коэффициента теплопроводности неодинакова [1, 3]. В измельченном материале мышечная, жировая и соединительная ткани равномерно распределяются по объему, обеспечивая постоянство ТФХ на всех направлениях движения теплового потока. Подготовленные образцы выдерживались в холодильной камере до достижения постоянной температуры 8–10 °С.

Изделия выполнялись в форме цилиндра с размерами $d \times h = 60 \times 320$ мм и в форме пластины с размерами $a \times b \times h = 160 \times 160 \times 32$ мм. Проверочный расчет проводили для следующих условий: теплоноситель – воздух, температура греющей среды – 200 °С, принятый коэффициент теплоотдачи – 40 Вт/(м²·°С). Корни характеристического уравнения для цилиндрического изделия при переносе тепла от боковой поверхности к центру составляют $N(Bi) = 1,395$ и $\mu_1^2 = 2,996$, при переносе тепла от торцов к центру – $N(Bi) = 1,267$ и $\mu_1^2 = 2,122$ [19]. При подборе коэффициентов при теплопереносе от торцов к центру форму изделия рассматриваем как пластину. Подставляя принятые и полученные значения в уравнения (4) и (2), получаем продолжительность нагревания при поперечном прогреве цилиндра 30,43 мин, при продольном переносе тепла – 1059,53 мин. Аналогичным образом проводим расчеты для пластины: при поперечном прогреве $N(Bi) = 1,143$ и $\mu_1^2 = 0,897$, продолжительность нагревания равна 18,93 мин, при продольном прогреве – $N(Bi) = 1,254$ и $\mu_1^2 = 1,903$, продолжительность нагревания 290,81 мин.

Таким образом, при выбранном соотношении размеров нагревание со стороны торцов практически не оказывает влияния на нагревание центра. Применение одномерных тел позволяет провести корректный теплотехнический эксперимент; вариации предложенных форм распространены в производственной практике. На основе полученных результатов можно предлагать решения для кулинарных изделий, которые являются телами ограниченных размеров, то есть частными случаями сочетания одномерных тел.

При проведении эксперимента измельченное мясо помещалось в однослойный марлевый мешок в форме цилиндра или пластины. Мешок помещался в кассету, представляющую собой сварную каркасную конструкцию из металлических стержней сечением 2,5 и 4,0 мм.

Каркас занимает менее 3 % внешней площади и не оказывает заметного влияния на процесс нагревания заготовки. В получаемом изделии исследуемый материал напрямую контакти-

рует с греющей средой, так как ячейки марли очень крупные по отношению к нитям (марля по ТУ ВУ 390287860.004-2011 с размерами ячеек 2×1 мм, плотность ткани 35 г/м^2 , при набивании растягивалась).

Тепловая обработка осуществлялась в пароконвекционном аппарате Упох-203G (Италия). Согласно действующим технологическим картам и инструкциям для операций жарки и запекания мясopодуkтов, диапазон температур греющей среды составляет $160\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве теплоносителя применялся сухой воздух и паровоздушная смесь влажностью $80\text{--}85 \%$. Тепловую обработку проводили до достижения температуры в центре изделия $85 \text{ }^\circ\text{C}$, определяющую кулинарную готовность [2].

Для измерения температуры применялся набор термоэлектрических преобразователей ТХА(К)-1199/52/2/1500/0,5 (Россия) с диаметром термоэлектродов $0,5$ мм в кремнеземной оплетке (по ГОСТ 8.338-2002). Для фиксации термопар использовалось специальное устройство, обеспечивающее точность установки и исключающее сбивание головок.

Результаты и их обсуждение. Обработка экспериментальных данных проводилась при условиях однозначности, описанных в [20]. Числа Био (Bi) и Фурье (Fo) рассчитывались по усредненным значениям коэффициентов тепло- и температуропроводности для сырого измельченного мяса, готового продукта и сухого вещества с учетом особенностей физико-химических преобразований нутриентов [21].

Графические зависимости $\Theta = f(\text{Fo})$ в полулогарифмических координатах для исследуемых образцов и режимных параметров представлены на рис. 1, 2.

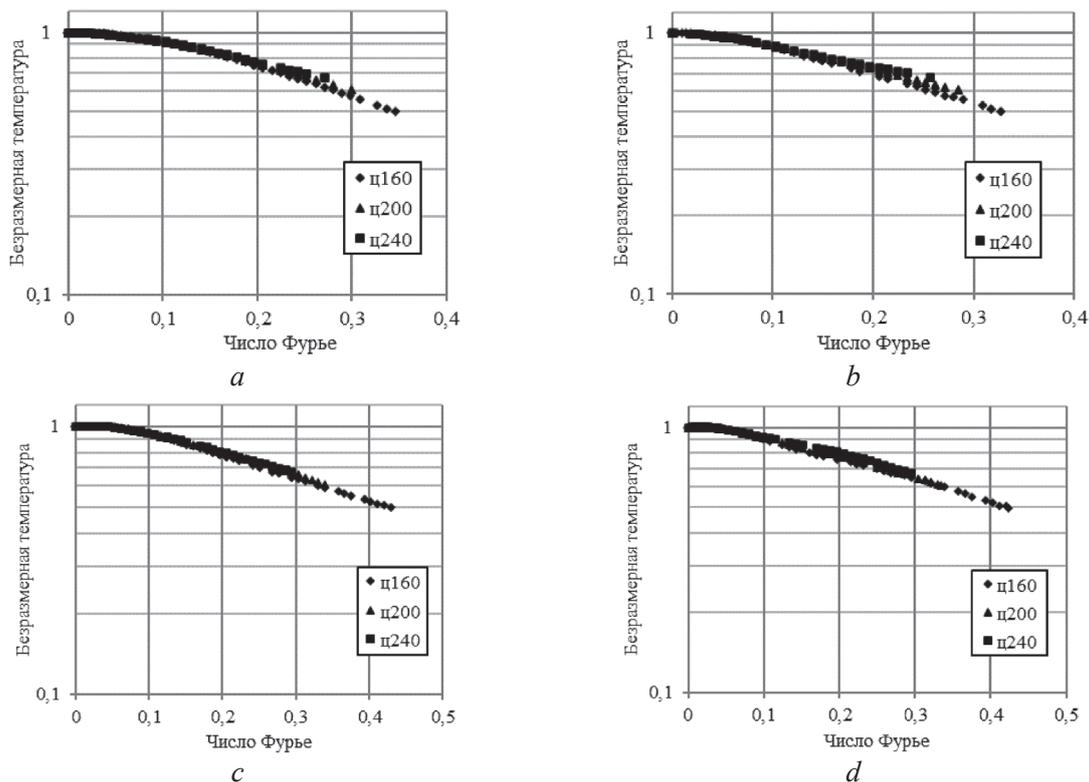


Рис. 1. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде цилиндра от числа Фурье: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 200 и $240 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 1. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a cylinder from the Fourier number: *a* – a moist, fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist, fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 200 and $240 \text{ }^\circ\text{C}$

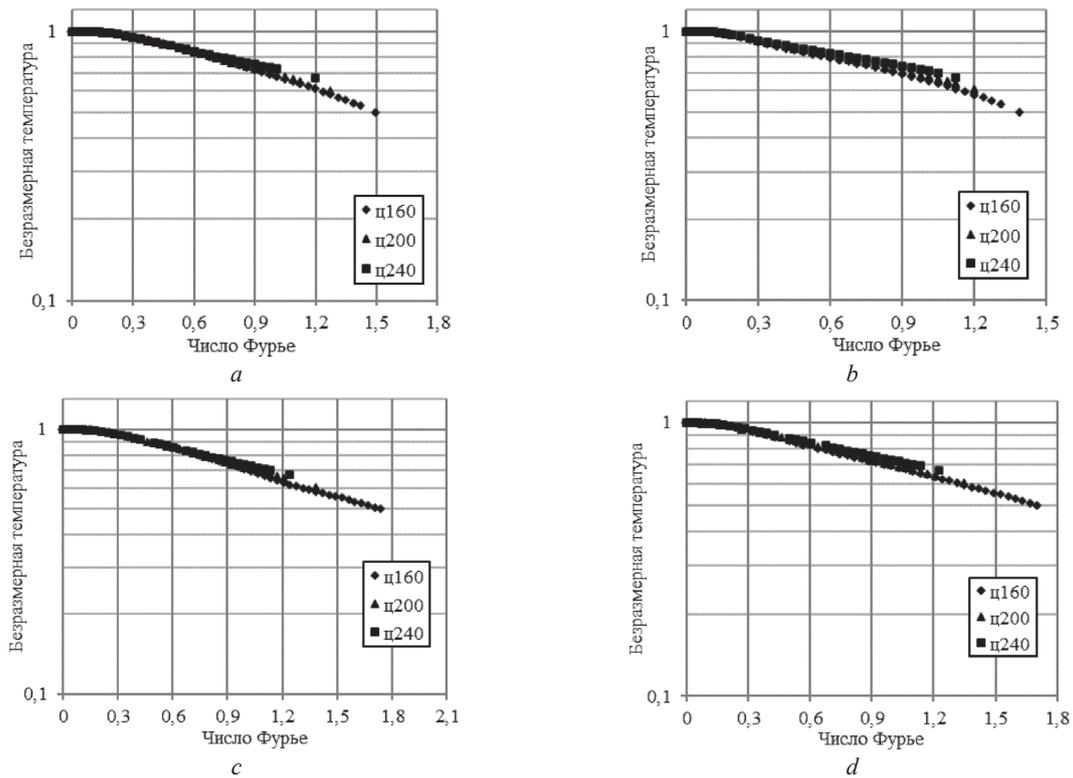


Рис. 2. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде пластины от числа Фурье: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °С, 200 и 240 °С

Fig. 2. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a plate from the Fourier number: *a* – a moist, fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist, fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °C, 200 and 240 °C

Полученные кривые в целом соответствуют теории нестационарной теплопроводности. Четко выделяются участки неупорядоченного и регулярного режима.

Следует отметить, что в пищевых продуктах перенос теплоты усиливается диффузией влаги. Для однородного тела с большим содержанием связанной влаги характерна молекулярная диффузия, которая аналогична молекулярному переносу теплоты, то есть теплопроводности. Закон теплопроводности Фурье и закон молекулярной диффузии Фика имеют одинаковую математическую форму, что объясняет наложение протекания данных процессов без выраженного искажения общей динамики. Сопровождение теплопроводности молекулярной диффузией вносит лишь количественные отличия в характеристики процесса теплообмена. Качественно же процесс нагревания исследуемых материалов не отличается от процесса нагревания твердых тел.

Также можно сделать вывод, что физико-химические изменения нутриентов и структурно-механические преобразования материала принципиального влияния на общий характер протекания теплообмена не оказывают.

Приведенные графические зависимости свидетельствуют о наступлении регулярного режима при $Fo \geq 0,2$ для всех исследуемых вариантов. Рассмотрим участки температурных кривых при $Fo \geq 0,2$ (рис. 3, 4).

Полученные графические зависимости подвергали математической обработке, по результатам которой определяли критериальные уравнения вида $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$ в зависимости от Bi для центрального слоя (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Критериальные уравнения $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$
 Table 1. Criteria equations $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$

Вид материала	Температура греющей среды, °C	Греющая среда			
		сухой воздух		паровоздушная смесь	
		Bi	уравнение	Bi	уравнение
<i>Форма – цилиндр</i>					
Влажный обезжиренный фарш	160	2,41	$\Theta = 1,292e^{-2,727Fo}$	2,32	$\Theta = 1,1529e^{-2,538Fo}$
	200	2,47	$\Theta = 1,2024e^{-2,299Fo}$	2,39	$\Theta = 1,1338e^{-2,208Fo}$
	240	2,54	$\Theta = 1,1055e^{-1,834Fo}$	2,48	$\Theta = 1,0351e^{-1,666Fo}$
Маловлажный жирный фарш	160	2,28	$\Theta = 0,9085e^{-1,072Fo}$	2,19	$\Theta = 1,1315e^{-1,923Fo}$
	200	2,33	$\Theta = 0,9435e^{-0,987Fo}$	2,26	$\Theta = 1,1425e^{-1,906Fo}$
	240	2,4	$\Theta = 0,9209e^{-0,795Fo}$	2,34	$\Theta = 1,1772e^{-1,894Fo}$
<i>Форма – пластина</i>					
Влажный обезжиренный фарш	160	1,52	$\Theta = 1,1387e^{-0,526Fo}$	1,46	$\Theta = 1,0819e^{-0,518Fo}$
	200	1,55	$\Theta = 1,0989e^{-0,462Fo}$	1,49	$\Theta = 1,0553e^{-0,444Fo}$
	240	1,58	$\Theta = 1,0617e^{-0,385Fo}$	1,54	$\Theta = 1,0292e^{-0,368Fo}$
Маловлажный жирный фарш	160	1,44	$\Theta = 1,1167e^{-0,465Fo}$	1,24	$\Theta = 1,0693e^{-0,44Fo}$
	200	1,46	$\Theta = 1,0949e^{-0,424Fo}$	1,28	$\Theta = 1,07e^{-0,424Fo}$
	240	1,49	$\Theta = 1,0718e^{-0,379Fo}$	1,32	$\Theta = 1,0552e^{-0,371Fo}$

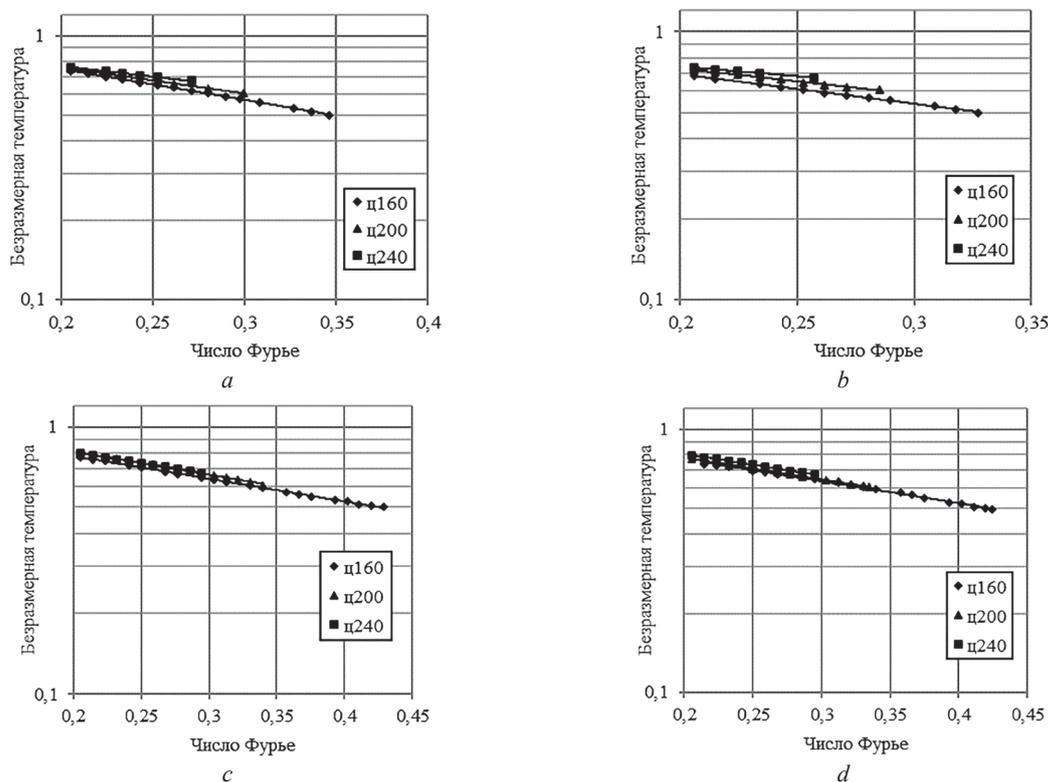


Рис. 3. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде цилиндра от числа Фурье на стадии регулярного режима $Fo \geq 0,2$: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °C, 200 и 240 °C

Fig. 3. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a cylinder from the Fourier number at the stage of the regular regime $Fo \geq 0.2$: *a* – a moist fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °C, 200 and 240 °C

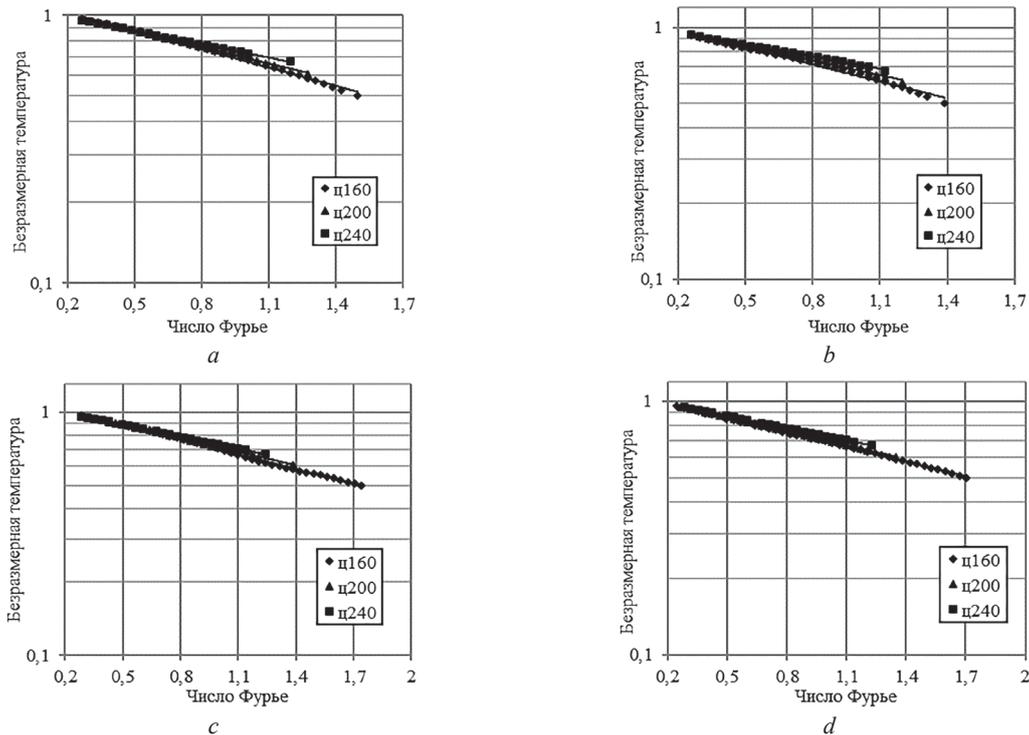


Рис. 4. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде пластины от числа Фурье на стадии регулярного режима $Fo \geq 0,2$: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °С, 200 и 240 °С

Fig. 4. The change in the dimensionless temperature in the center of products in the form of a plate from the Fourier number at the stage of the regular regime $Fo \geq 0.2$: *a* – a moist fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °C, 200 and 240 °C

Коэффициент теплоотдачи при определении числа Био находили суммированием конвективной и лучистой составляющей. Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяли по теории подобия из критериального уравнения $Nu = f(Re, Pr)$ [22, 23] при скорости движения теплоносителя 3,9 м/с согласно замерам многофункционального измерительного прибора Testo 435-4 (Германия) в рабочей зоне камеры пароконвекционного аппарата. Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяли по формуле Стефана–Больцмана [22, 23].

Обращают на себя внимание (см. табл. 1) несколько меньшие значения полученных коэффициентов μ_1^2 и $N(Bi)$ для изделий, обработанных в паровоздушной смеси. Данный эффект связан с характером колебаний температурных градиентов. На начальном этапе нагревания при неупорядоченном режиме заготовка получает значительно большее количество теплоты по сравнению с образцами, обработанными в сухом воздухе, из-за наличия конденсационных процессов. К моменту наступления регулярного режима для паровоздушной смеси конденсационные процессы прекращаются, и далее теплоотдача происходит в условиях свободной конвекции. В воздушной среде рост температуры более равномерен и протекает при практически постоянных значениях коэффициента теплоотдачи.

Для маловлажных жирных образцов характерны более низкие значения полученных коэффициентов μ_1^2 и $N(Bi)$ по сравнению с влажными обезжиренными, что объяснимо низкой теплопроводностью материала.

Проверка достоверности полученных критериальных уравнений и сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки исследуемых изделий показаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки исследуемых изделий

Table 2. Comparison of experimental and calculated values of the duration of heat treatment of the studied products

Вид материала	Температура греющей среды, °С	Греющая среда			
		сухой воздух		паровоздушная смесь	
		$\tau_{\text{эксп, мин}}$	$\tau_{\text{расч, мин}}$	$\tau_{\text{эксп, мин}}$	$\tau_{\text{расч, мин}}$
<i>Форма – цилиндр</i>					
Влажный обезжиренный образец	160	37	37,25	35	35,22
	200	32	31,93	30,5	30,42
	240	29	28,9	27,5	27,55
Маловлажный жирный образец	160	48	49,1	47,5	47,4
	200	38	38,66	37,5	37,34
	240	33	33,4	33	32,6
<i>Форма – пластина</i>					
Влажный обезжиренный образец	160	40	40,9	37	37,8
	200	34	34,51	32	32,78
	240	32	31,57	30	30,74
Маловлажный жирный образец	160	49	48,7	48	49,13
	200	39	39,39	38	37,86
	240	35	34,5	34,5	34,04

Применение в ходе экспериментальных исследований одномерных тел позволяет сравнить полученные коэффициенты $N(Bi)$ и μ_1^2 с табличными значениями [19] для твердых тел (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициентов $N(Bi)$ и μ_1

Table 3. Values of coefficients $N(Bi)$ and μ_1

Форма	$Bi_{\text{экв}}$	$N(Bi)$		μ_1^2	
		экспериментальные	справочные	экспериментальные	справочные
Цилиндр	Влажный обезжиренный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	2,41	1,292	1,376	2,727	2,849
	2,47	1,202	1,381	2,299	2,885
	2,54	1,106	1,387	1,834	2,932
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>				
	2,322	1,153	1,368	2,538	2,785
	2,386	1,134	1,374	2,208	2,83
	2,476	1,035	1,381	1,666	2,889
	Маловлажный жирный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	2,278	1,218	1,364	2,03	2,755
	2,330	1,205	1,369	1,994	2,791
	2,399	1,178	1,375	1,872	2,839
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь высокой влажности</i>				
	2,191	1,152	1,356	1,971	2,693
	2,257	1,143	1,362	1,906	2,740
2,341	1,132	1,370	1,781	2,799	
Пластина	Влажный обезжиренный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	1,522	1,139	1,155	0,526	0,983
	1,546	1,099	1,156	0,462	0,993
	1,580	1,062	1,158	0,385	1,008
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>				
	1,462	1,082	1,151	0,518	0,957
	1,491	1,055	1,153	0,444	0,970
1,536	1,029	1,155	0,368	0,989	

Окончание табл. 3

Форма	В _{экв}	N(Bi)		μ_1^2	
		экспериментальные	справочные	экспериментальные	справочные
Маловлажный жирный образец					
<i>Греющая среда – сухой воздух</i>					
	1,440	1,117	1,150	0,465	0,947
	1,462	1,095	1,151	0,424	0,956
	1,494	1,072	1,153	0,379	0,969
<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>					
	1,239	1,075	1,137	0,439	0,859
	1,276	1,070	1,139	0,424	0,875
	1,320	1,055	1,142	0,371	0,895

Из табл. 3 видно, что экспериментальные коэффициенты $N(Bi)$ и μ_1^2 имеют меньшие значения по сравнению с табличными данными для твердых тел, что может быть объяснено влиянием на процесс теплообмена фазовых и физико-химических превращений.

Характер изменения $N(Bi)$ и μ_1^2 для твердых тел и изучаемых изделий противоположен. При росте числа Био для твердых тел свойственно увеличение $N(Bi)$ и μ_1^2 , в то время как для изделий из мясных фаршей характерно их уменьшение. Можно предположить, что интенсивность фазовых и физико-химических превращений возрастает по мере повышения температуры, что приводит к удельному снижению интенсивности нагревания. То есть при прочих равных условиях, чем больше потери энергии, связанные с агрегатными изменениями, тем меньший темп нагревания.

Полученные зависимости распространяются и на современную номенклатуру продукции мясоперерабатывающих производств. Мясные кулинарные изделия рассматриваются в данном случае как тела конечных размеров. Расчет температурного поля проводится на основе теоремы перемножения решений.

Заключение. Представлены результаты обработки на основе теории регулярного режима нестационарной теплопроводности опытных данных процесса нагревания влажных капиллярно-пористых тел различного состава (мясных изделий) в сухом воздухе и паровоздушной смеси. Показаны особенности протекания теплообменных процессов в центральном слое изделий из мясного фарша при прямом контакте греющей среды с поверхностью продукта. Получены критериальные уравнения подобия, описывающие протекание процесса нагревания в центральном слое изучаемых образцов при исследуемых режимных параметрах. Проведено аналитическое сравнение экспериментальных коэффициентов в критериальных уравнениях подобия для различных образцов и режимных параметров с табличными значениями для твердых тел. Дана проверка и сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки изделий из измельченного мяса.

Практическая значимость исследований состоит в повышении качественных характеристик мясных рубленых изделий и оптимизации оперативного производственного планирования за счет применения методики прогнозного расчета продолжительности тепловых операций.

Список использованных источников

1. Николаев, Н. С. Моделирование процесса термообработки мясного сырья как сложной системы: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.18.12 / Н. С. Николаев; Моск. гос. акад. приклад. биотехнологии. – М., 1996. – 55 с.
2. Рогов, И. А. Технология мяса и мясных продуктов / И. А. Рогов, А. Г. Забашта, Г. П. Казюлин. – М.: КолосС, 2009. – Кн. 2: Технология мясных продуктов. – 712 с.
3. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – 2-е изд. – М.: Пищ. пром-сть, 1980. – 288 с.
4. Marcotte, M. Thermophysical properties of processed meat and poultry products / M. Marcotte, Ali R. Taherian, Y. Karimi // J. Food Eng. – 2008. – Vol. 88, iss. 3. – P. 315–322. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.016>
5. Дульгер, Н. В. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик продуктов животного происхождения / Н. В. Дульгер, Р. Н. Зарипов, В. Н. Лысова // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2005. – № 2 (25). – С. 284–287.
6. Светлов, Ю. В. Эффективная теплопроводность и внутренняя поверхность переноса пористых и волокнистых структур (на примере пищевых материалов) / Ю. В. Светлов, Ю. Б. Никифоров // Тонкие хим. технологии. – 2015. – Т. 10, № 6. – С. 71–78.

7. Косой, В. Д. Совершенствование производства колбас: учеб. пособие / В. Д. Косой, В. П. Дорохов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 766 с.
8. Бражников, А. М. Теория термической обработки мясopодуков / А. М. Бражников. – М.: Агрoпрoмиздат, 1987. – 271 с.
9. Расчет продолжительности процесса термовлажностной обработки полуфабрикатов на основе животного и растительного сырья / Л. Э. Глаголева [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий. – 2018. – Т. 80, № 2. – С. 51–57. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57>
10. Верболоз, Е. И. Особенности низкотемпературной тепловой обработки мясopодуков в пароконвектомате с наложением ультразвуковых колебаний / Е. И. Верболоз, С. А. Романчиков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий. – 2017. – Т. 79, № 3. – С. 35–41. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-3-35-41>
11. Isleroglu, H. Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven / H. Isleroglu, F. Kaymak-Ertekin // J. Food Eng. – 2016. – Vol. 181. – P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.027>
12. Ahmad, S. Mathematical modeling of meat cylinder cooking / S. Ahmad, M. A. Khan, M. Kamil // LWT – Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 60, iss. 2, part 1. – P. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.061>
13. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat / A. Kondjoyan [et al.] // Meat Sci. – 2013. – Vol. 95, iss. 2. – P. 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>
14. Rinaldi, M. Real-time estimation of slowest heating point temperature and residual cooking time by coupling multipoint temperature measurement and mathematical modelling: Application to meat cooking automation / M. Rinaldi, E. Chiavaro, R. Massini // Food Control. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 412–418. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.009>
15. Chen, H. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties / H. Chen, B. P Marks, R. Y Murphy // J. Food Eng. – 1999. – Vol. 42, iss. 3. – P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/S0260-8774%2899%2900111-9>
16. Erdođdu, F. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters / F. Erdođdu // J. Food Eng. – 2005. – Vol. 68, iss. 2. – P. 233–238. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.038>
17. Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review / J. Li [et al.] // Trends in Food Sci. & Technology. – Vol. 131. – P. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018>
18. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 236 с.
19. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е. В. Аметистов [и др.]; под общ. ред. Е. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
20. Смагина, М. Н. Влияние изменения теплофизических характеристик материала на процесс нагревания изделий из мясного фарша / М. Н. Смагина, Д. А. Смагин, А. А. Смоляк // Пищевая промышленность: наука и технология. – 2020. – № 4 (5). – С. 61–68. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-61-69](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69)
21. 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>
22. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену: учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – 3-е изд. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 196 с.
23. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

References

1. Nikolaev N. S. *Modeling of the Process of Heat Treatment of Meat Raw Materials as a Complex System*. Moscow, Moscow State Academy of Applied Biotechnology, 1996. 55 p. (in Russian).
2. Rogov I. A., Zabashita A. G., Kaziulin G. P. *Technology of Meat and Meat Products. Book 2. Technology of Meat Products*. Moscow, KolosS Publ., 2009. 712 p. (in Russian).
3. Ginzburg A. S., Gromov M. A., Krasovskaya G. I. *Thermophysical Characteristics of Food Products*. 2nd ed. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 288 p. (in Russian).
4. Marcotte M., Taherian Ali R., Karimi Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 88, iss. 3, pp. 315–322. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.016>
5. Dul'ger N. V., Zaripov R. N., Lysova V. N. Experimental evaluation of thermophysical characteristics of animal products. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2005, no. 2 (25), pp. 284–287 (in Russian).
6. Svetlov Yu. V., Nikiforov Yu. B. Effective thermal conductivity and inner transfer surface of porous and fibrous materials on the example of foodstuffs. *Tonkie Khimicheskie Tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2015, vol. 10, no. 6, pp. 71–78 (in Russian).
7. Kosoy V. D., Dorohov V. P. *Improving the Production of Sausages*. Moscow, DeLi print Publ., 2006. 766 p. (in Russian).
8. Bragnikov A. M. *Theory of Heat Treatment of Meat Products*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 271 p. (in Russian).
9. Glagoleva L. E., Zatsepilina N. P., Kopylov M. V., Nesterenko I. V. Calculation of the duration of the process of heat and moisture treatment of semi-finished products based on animal and vegetable raw materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2018, vol. 80, no. 2, pp. 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57>

10. Verboloz E. I., Romanchikov S. A. Features of low-temperature heat treatment of meat products in a steam convector with the imposition of ultrasonic vibrations. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 3, pp. 35–41 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-3-35-41>
11. Isleroglu H., Kaymak-Ertekin F. Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven. *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 181, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.027>
12. Ahmad S., Khan M. A., Kamil M. Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, vol. 60, iss. 2, part 1, pp. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.061>
13. Kondjoyan A., Ouilic S., Portanguen S., Gros J.-B. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *Meat Science*, 2013, vol. 95, iss. 2, pp. 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>
14. Rinaldi M., Chiavaro E., Massini R. Real-time estimation of slowest heating point temperature and residual cooking time by coupling multipoint temperature measurement and mathematical modelling: Application to meat cooking automation. *Food Control*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 412–418. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.009>
15. Chen H., Marks B. P., Murphy R. Y. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering*, 1999, vol. 42, iss. 3, pp. 139–146. <https://doi.org/10.1016/S0260-8774%2899%2900111-9>
16. Erdoğan F. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*, 2005, vol. 68, iss. 2, pp. 233–238. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.038>
17. Jiaheng Li, Yong Deng, Weidong Xu, Runan Zhao, Tingting Chen, Mingzhe Wang, Enbo Xu, Jianwei Zhou, Wenjun Wang, Donghong Liu. Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 131, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018>
18. Skurikhin I. M., Tutel'iana V. A. *Chemical Composition of Russian Food Products*. Moscow, DeLi print Publ., 2002. 236 p. (in Russian).
19. Grigor'ev V. A., Zorin V. M., eds. *Heat and Mass Transfer. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p. (in Russian).
20. Smagina M. N., Smagin D. A., Smoliak A. A. The influence of changes in the thermophysical characteristics of the material on the heating process of minced meat products. *Pishchevaia promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food Industry: Science and Technology*, 2020, no. 4 (5), pp. 61–68 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-61-69](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69)
21. 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>
22. Tsvetkov F. F., Kerimov R. V., Velichko V. I. *A Task Book on Heat and Mass Transfer*. 3rd ed. Moscow, Publishing House of MEI, 2010. 196 p. (in Russian).
23. Krasnoshchekov E. A., Sukomel A. S. *Taskbook on Heat Transfer*. 4th ed. Moscow, Energy Publ., 1980. 288 p. (in Russian).