ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497
https://elibrary.ru/TTFIQO

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Температурные изменения в мясных изделиях при жарке в пароконвекционных печах

М. Н. Смагина*, Д. А. Смагин

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев, Республика Беларусь

Поступила в редакцию: 01.06.2023
Принята после рецензирования: 19.10.2023
Принята к публикации: 07.11.2023

**М. Н. Смагина: m.n.smagina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-8762-4730*
Д. А. Смагин: https://orcid.org/0009-0004-2974-5580

© М. Н. Смагина, Д. А. Смагин, 2024

Аннотация.
В производство пищевой продукции, в том числе мясной, внедряются пароконвектоматы, для рационального применения которых необходимо создавать научно-практические основы. Цель работы – исследование характера изменения среднеобъемной температуры и температурного градиента в мясных изделиях, выполненных в форме одномерных тел и различающихся по нутриентному составу, при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси.
Исследовали два образца мясных изделий, различных по содержанию влаги и жира: из куриного филе (влажность 74,5 %, содержание жира 1,9 %) и лопаточной части свинины (влажность 55,1 %, содержание жира 29,4 %). Изделия формировались в виде одномерных цилиндра и пластины, а затем подвергались нагреванию в диапазоне температур 160–240 °С в пароконвекционном аппарате Unox-203G (Италия). В качестве греющей среды применяли сухой воздух и паровоздушную смесь влажностью 80–85 %. Для измерения температуры применяли термопары, подключенные к измерителю Сосна-004.
Выявили закономерности изменения среднеобъемной температуры и температурного градиента в исследуемых слоях мясных изделий. Для температурного градиента выделили три этапа при обработке в паровоздушной смеси и четыре в сухом воздухе. Изменение среднеобъемной температуры для паровоздушной смеси описывается уравнением степенной зависимости, для сухого воздуха – линейной. При нагревании в сухом воздухе темп изменения температурного градиента был постоянен, но снижался на определенном этапе. Темп изменения среднеобъемной температуры в течение 5 мин был невысоким, но затем повышался, сохраняя значение до конца процесса. При нагревании в паровоздушной смеси темп изменения температурного градиента вначале снижался, достигая минимума на 4–5 мин, а затем рос. Для среднеобъемной температуры характерен высокий темп изменения в течение первых 5 мин, а затем снижение. Изделия с низким содержанием жира (куриное филе) прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной смеси и на 9–23 % в сухом воздухе. Для изделий в форме пластины была характерна более длительная термообработка. На характер изменения температурного градиента и среднеобъемной температуры состав и форма выраженного влияния не оказывали.
Полученные зависимости позволяют осуществить подбор оптимальных температурно-влажностных режимов конвективной жарки мясопродуктов.

Ключевые слова. Мясопродукты, пароконвектомат, термообработка, термометрические показатели, температурный градиент, среднеобъемная температура, сухой воздух, паровоздушная смесь, одномерное тело

Для цитирования: Смагина М. Н., Смагин Д. А. Температурные изменения в мясных изделиях при жарке в пароконвекционных печах // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 156–166. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497
https://elibrary.ru/TTFIQO

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Temperature Changes in Meat Products Fried in Steam-Convection Oven

Marina N. Smagina*, Denis A. Smagin

Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Republic of Belarus

Received: 01.06.2023
Revised: 19.10.2023
Accepted: 07.11.2023

**Marina N. Smagina: m.n.smagina@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-8762-4730*
Denis A. Smagin: https://orcid.org/0009-0004-2974-5580

© M.N. Smagina, D.A. Smagin, 2024

Abstract.
Combination steam ovens, or combi steamers, have entered all spheres of food production, including the meat industry. Their rational use requires a scientific and practical foundation. This research featured the changes in mean volume temperature and temperature gradient that occur in meat products (one-dimensional bodies with different nutrient compositions) during heat treatment in dry air and a steam-air mix.
The research involved two samples of meat products with different moisture and fat contents. The chicken fillet sample had a moisture content of 74.5% and a fat content of 1.9% while the pork shoulder sample had a moisture content of 55.1% and a fat content of 29.4%. Shaped as a one-dimensional cylinder and a plate, the samples were subjected to heating at the temperature range of 160–240°C in a Unox-203G steam-convection oven (Italy). Dry air and a steam-air mix with a humidity of 80–85% served as a heating medium. The temperature was measured using thermocouples attached to a Sosna-004 meter.
The research revealed some patterns in the mean volume temperature and temperature gradient. The temperature gradient involved three stages during processing in a steam-air mix and four stages when treated with dry air. The change in the mean volume temperature for the steam-air mix could be described by a power law equation; the dry air treatment was described using a linear equation. When heated in dry air, the rate of change in the temperature gradient was constant at first but started to decrease at a certain stage. The change rate in the mean volume temperature remained low for 5 min and started to increase onwards, maintaining its value until the end of the process. When heated in a steam-air mix, the change rate in the temperature gradient dropped to its minimum in 4–5 min and started to grow. The mean volume temperature demonstrated a high change rate during the first 5 min and went down. The chicken fillet with its low fat content warmed up faster by 13–26% when processed in a steam-air mix and by 9–23% when treated in dry air. The plate-shaped products needed longer heat treatment. The composition and form had no significant effect on the nature of the change in the temperature gradient and mean volume temperature.
The obtained dependencies made it possible to select the optimal temperature and humidity conditions for convective frying of meat products.

Keywords. Meat products, combi oven, heat treatment, thermometric indicators, temperature gradient, average volume temperature, dry air, steam-air mixture, one-dimensional body

For citation: Smagina MN, Smagin DA. Temperature Changes in Meat Products Fried in Steam-Convection Oven. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):156–166. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497

Введение

В процессе переработки мясопродуктов в сырые полуфабрикаты имеет значение разница температур между поверхностными слоями и центром. Интенсивность нагревания внутренних слоев при таких условиях определяется характером распространения теплоты внутри тела, а внешние условия теплообмена приобретают подчиненное значение.

Запеченное мясное изделие состоит из корки (практически сухой материал с температурой выше температуры насыщения водяного пара) и внутреннего тела (влажный материал с температурой меньшей или равной температуре насыщения водяного пара). Корка является внешней греющей средой для внутреннего влажного тела. Внутреннее влажное тело прогревается послойно, каждый слой становится тепловоспринимающей средой для предыдущего и теплоотдающей для последующего. Верхний влажный (подкорковый) слой получает наибольшее количество теплоты, сравнительно быстро прогревается и становится основным теплопередающим слоем для всего продукта. Каждый следующий слой получает от предыдущего определенное количество теплоты, которое расходуется на нагрев, поддержание температуры рассматриваемого слоя и рост температуры последующего слоя. Для последнего (центрального) слоя характерно отсутствие потерь

теплоты, его температура повышается с большим отставанием от подкоркового. Возникает температурный градиент, направленный от периферии к центру. В реальных условиях из-за невысокой теплопроводности мяса к моменту, когда в центре достигается заданная температура, температура любого другого слоя будет выше, стремясь к температуре насыщения водяного пара в направлении к подкорковому [1–13].

Изменения, вызываемые нагревом, качественно не имеют отличий, хотя различаются количественно. Каждой температуре присуще характерное изменение числа свободных функциональных групп, соответствующее изменению белковых и жировых структур. Степень глубины процессов возрастает с увеличением температуры греющей среды. Развитие коагуляционных и постденатурационных явлений белков, расплав и гидролиз жира сопровождаются изменением теплофизических характеристик и уменьшением водосвязывающей способности биологического материала, повышением потерь влаги, усилением жесткости и др. Данные процессы протекают ступенчато по мере повышения температуры, в результате чего для каждого слоя последствия нагревания различаются. Технологические последствия, вызываемые нагревом, становятся неравномерными по толщине продукта [3–18].

Традиционно термообработка мясных изделий изучается с точки зрения теплофизики процесса или подбора технологических параметров под заданный продукт [1–19]. Однако с производственной точки зрения важно описать характер изменения температуры в общем объеме изделия и температурной разницы в крайних точках, оценить влияние на данные показатели состава фарша, геометрической формы изделия, применяемого теплоносителя и температурного режима в рабочей камере.

Цель исследования – изучение характера изменения среднеобъемной температуры и температурного градиента в мясных изделиях, выполненных в форме одномерных тел и различающихся по нутриентному составу, при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на двух образцах измельченного мясного сырья, различных по содержанию влаги и жира [20]:

1) мясо куриного филе без кожи (влажность 74,5 %, содержание жира 1,9 %) – влажный образец с низким содержанием жира (ВОНЖ);

2) мясо лопаточной части свинины (влажность 55,1 %, содержание жира 29,4 %) – маловлажный образец с высоким содержанием жира (МОВЖ).

С ростом температуры теплофизические характеристики мясных фаршей изменяются в зависимости от влажности и содержания жира в исходном сырье [2, 4, 6–13, 17–19]. Выбор исследуемых материалов обусловлен целесообразностью оценки влияния плавления жира и интенсивности массообмена на термометрические показатели процесса.

При разработке программы экспериментальных исследований принято решение не сужать область проводимых изысканий конкретными изделиями, а использовать формы и размеры, которые могут быть обобщающими для широкой номенклатуры пищевой продукции. Поэтому для исследования выбрали тела, формируемые в виде одномерных тел: цилиндра и пластины. Подобный подход позволяет провести корректный теплотехнический эксперимент. Вариации предложенных форм распространены в производственной практике. На основе полученных результатов можно предлагать решения для тел ограниченных размеров, являющихся частными случаями сочетания безграничных форм.

Для обеспечения постоянства размеров и форм исследуемых образцов, а также прямого контакта поверхности изделия с греющей средой применяли однослойный марлевый мешок, сшитый в виде цилиндра размером 60×320 мм или пластины размером 160×160×32 мм, который закрепили в специальной кассете. Теплофизические расчеты показывают, что подобные тела можно считать одномерными [18].

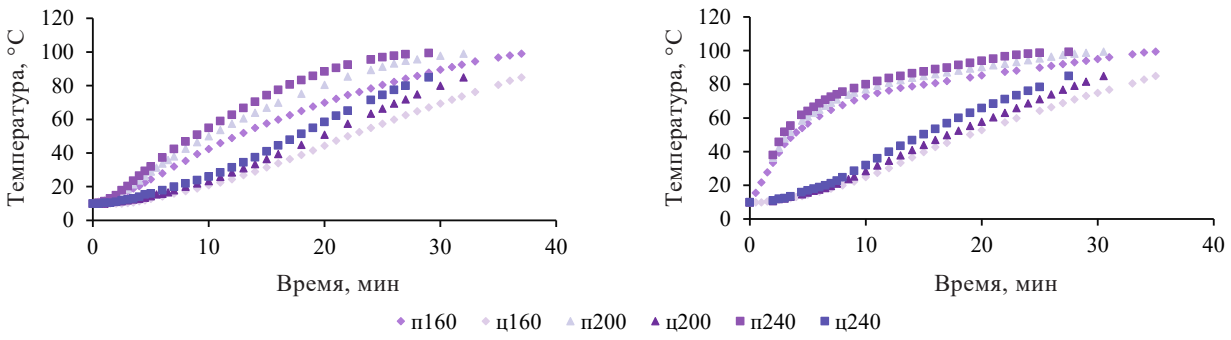
Кассеты представляют собой сварную каркасную конструкцию из металлических стержней сечением 2,5 и 4 мм, выполненные в виде цилиндра или пластины. Внутренние размеры кассеты равны размерам исследуемых форм. Металлические стержни занимают менее 3 % площади предложенных кассет и не оказывают заметного влияния на процесс нагревания заготовки.

При набивании марлевого мешка измельченным мясным сырьем марля натягивалась, размеры ячеек увеличивались и превышали исходные. В получаемом таким образом изделии исследуемый материал контактирует с греющей средой, т. к. ячейки марли крупные по отношению к нитям.

Образцы исследуемых материалов подвергались нагреванию в диапазоне температур 160–240 °C в пароконвекционном аппарате Unox-203G (Италия) до достижения температуры в центре 85 °C. В качестве греющей среды применялся сухой воздух и паровоздушная смесь влажностью 80–85 %. Для измерения температуры подкоркового и центрального слоев применяли комплект термоэлектрических преобразователей ТХА(К)-1199/52/2/1500/0,5, подключенных к измерителю-регулятору Сосна-004, которые закреплялись на устройстве, исключающем сбивание головок. Замеры осуществлялись в центре и в подкорковом слое изделий. Расчетные результирующие среднеквадратичные погрешности определяемых величин не превышают 3 %.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований изображались в виде термограмм изменения абсолютной температуры в исследуемых точках во времени (рис. 1–4).

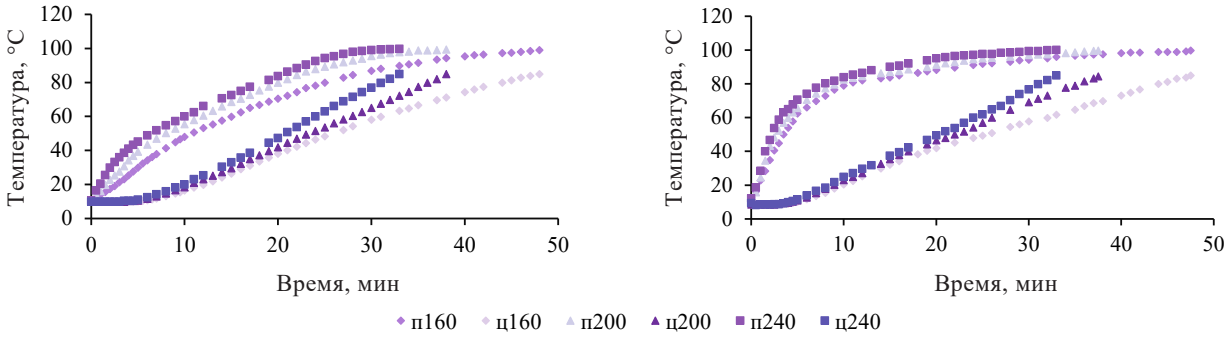


a b

Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 1. Термограмма для влажного образца с низким содержанием жира в форме цилиндра: a – в воздушной среде; b – в паровоздушной среде

Figure 1. Low-fat wet cylinder sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram

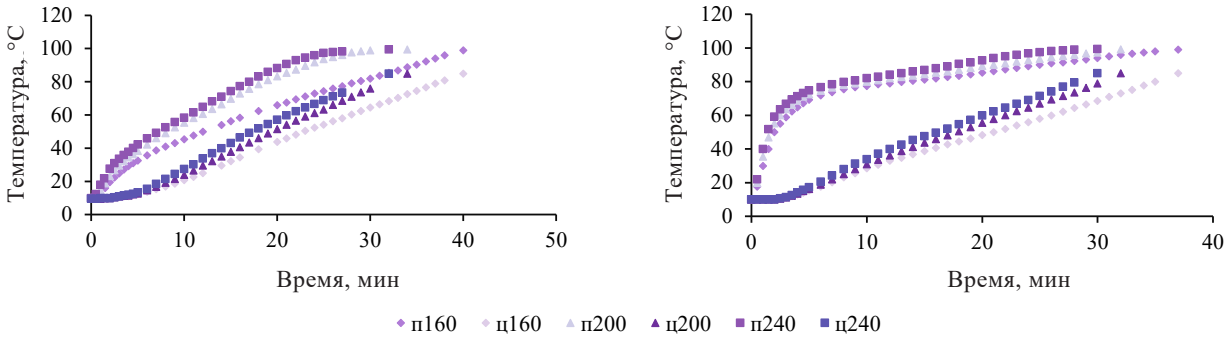


a b

Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 2. Термограмма для маловлажного образца с высоким содержанием жира в форме цилиндра: a – в воздушной среде; b – в паровоздушной среде

Figure 2. High-fat slightly wet cylinder sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram

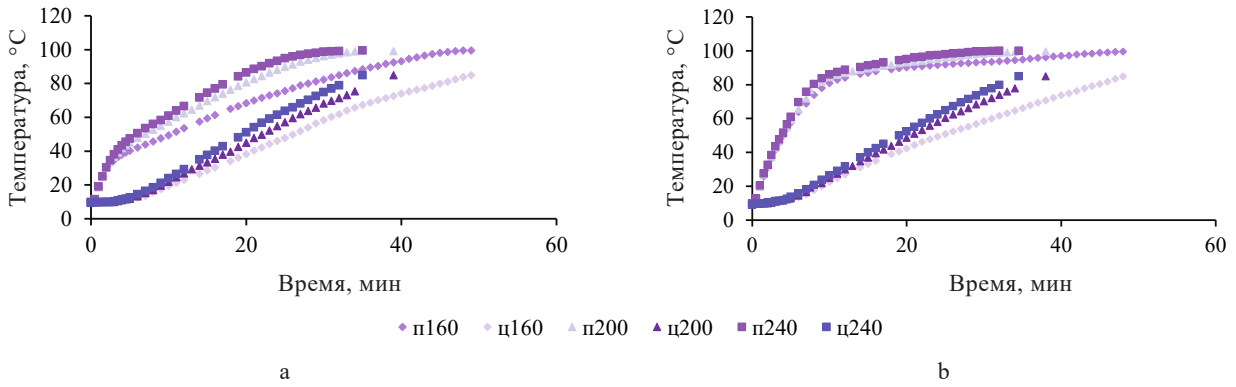


a b

Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 3. Термограмма для влажного образца с низким содержанием жира в форме пластины: a – в воздушной среде; b – в паровоздушной среде

Figure 3. Low-fat wet plate sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram



Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 4. Термограмма для маловлажного образца с высоким содержанием жира в форме пластины: a – в воздушной среде; b – в паровоздушной среде

Figure 4. High-fat slightly wet plate sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram

Для всех исследуемых вариантов форм и фаршей при обработке в паровоздушной смеси термометрические кривые имеют малый разброс значений температурного роста для различных температурных режимов. Данный факт может быть объяснен наличием конденсационных процессов. Температура верхних слоев изделий на начальном этапе нагревания ниже температуры насыщения водяного пара. При помещении изделий в паровоздушную смесь высокой влажности на изделиях образуется конденсатная пленка, которая равномерно увлажняет всю поверхность. Равномерный прогрев поверхности изделий вместе с низкой теплопроводностью материала обеспечивает на начальном этапе обработки практически одинаковую температуру подкоркового слоя для различных температурных режимов нагревания.

При обработке в среде нагретого воздуха термометрические кривые расходятся в зависимости от температуры греющей среды (чем выше температура в рабочей камере, тем интенсивнее прогрев). В данном случае изделия нагреваются с различной скоростью, в зависимости от температуры греющей среды, за счет конвективной теплоотдачи сухого воздуха и при отсутствии конденсационных процессов.

Наряду с эффектом выравнивания температур при обработке в паровоздушной смеси высокой влажности наличие конденсационных процессов в верхних слоях изделий на начальном этапе нагревания обуславливает тепловой поток, который приводит к быстрому прогреву подкоркового слоя. В среде нагретого воздуха прогревание подкоркового слоя протекает менее интенсивно. В форме одномерного цилиндра средняя температура в подкорковом слое 60 °С (температура денатурации белков) достигается при обработке в паровоздушной среде примерно на 5–7 мин, в нагретом воздухе на 10–15 мин. Для маловлажного образца с высоким содержанием жира (МОВЖ) средняя температура в подкорковом слое 60 °С достигается при обработке в паровоздушной среде на 4–6 мин, в нагретом воздухе на 10–17 мин. При нагревании изделий в форме одномерной пластины средняя температура в подкорковом слое 60 °С достигается для влажного образца с низким содержанием жира (ВОНЖ) при обработке в паровоздушной среде на 3–4 мин, в нагретом воздухе на 10–17 мин, а для МОВЖ на 5–6 и 9–15 мин соответственно.

Для оценки последствий температурных изменений рассчитали среднюю температуру по объему изделия и температурный градиент по крайним точкам для каждого момента времени.

Среднеобъемную температуру Тср определяли как среднеарифметическое для температур подкоркового и центрального слоев. Температурные градиенты $\left(\frac{\partial T}{r}\right)$ по радиусу для цилиндрических изделий и $\left(\frac{\partial T}{h}\right)$ по полутолщине для изделий в форме пластины определяли как разность температур подкоркового и центрального слоев, отнесенную к расстоянию между ними в сантиметрах.

Графические зависимости изменения температурных градиентов и среднеобъемной температуры во времени представлены на рисунках 5 и 6.

Кривые изменения температурных градиентов при обработке в среде паровоздушной смеси высокой влажности характеризуются большей равномерностью и сходимостью по сравнению с нагреванием в воздухе. Это можно объяснить выравнивающим температурным эффектом при конденсации водяного пара.

Геометрия построения кривых температурных градиентов для паровоздушной смеси позволяет выделить следующие этапы процесса:

1. Рост температурного градиента в течение первых 5–7 мин нагревания;

2. Достижение максимума температурного градиента;

3. Постепенное снижение градиента.

Геометрия построения кривых температурных градиентов для воздуха позволяет выделить следующие этапы процесса:

1. Рост температурного градиента в течение первых 7–10 мин нагревания;

2. Достижение максимума температурного градиента;

3. Сохранение постоянной величины градиента в течение 10–15 мин с некоторыми колебаниями от среднего значения;

4. Постепенное снижение градиента.

Первый этап аналогичен для обоих вариантов и характеризуется быстрым ростом температуры в подкорковом слое при медленном нагревании центра.

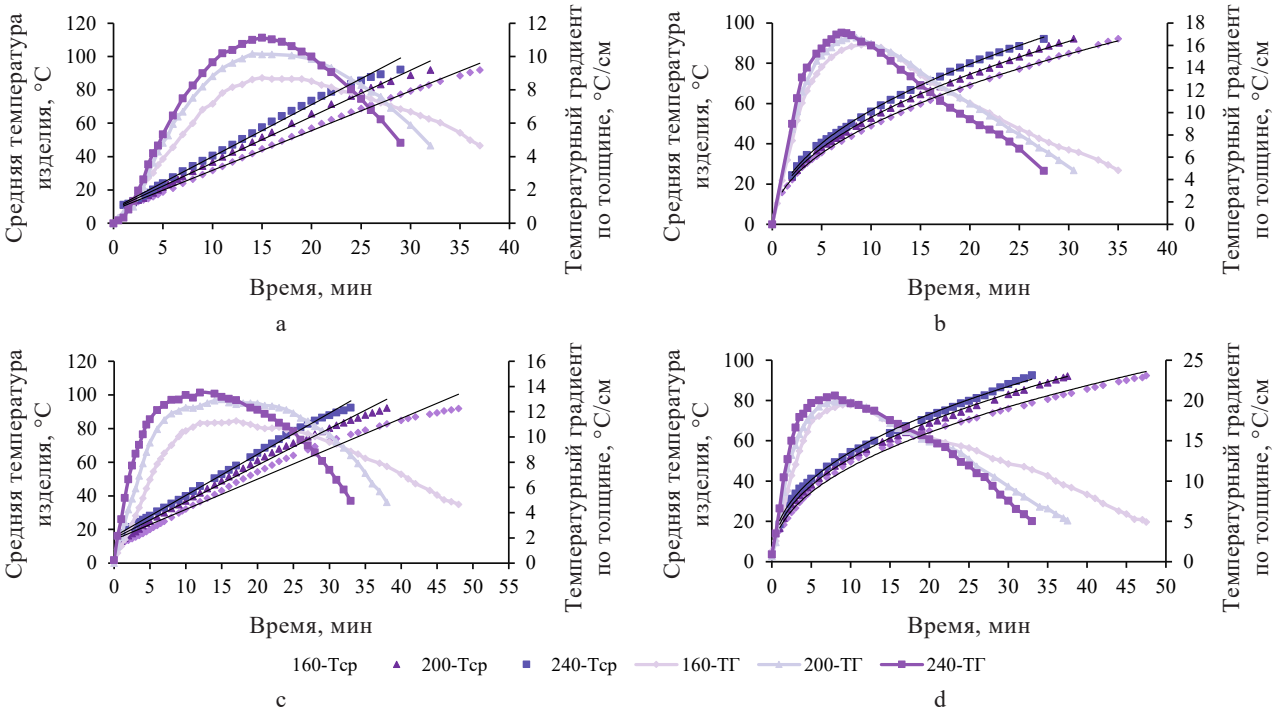
Второй этап также аналогичен для обоих вариантов. Однако при обработке в воздушной среде предельные значения градиента колеблются в зависимости от температуры теплоносителя, достигая 15–20 °С. Для процесса нагревания в паровоздушной среде характерны колебания градиента порядка 5–8 °С в зависимости от температуры теплоносителя. Данное наблюдение можно объяснить конденсацией на поверхности изделий на начальном периоде нагревания при обработке в паровоздушной среде, приводящей к примерно одинаковым значениям теплового потока на поверхности при разных температурах в рабочей камере. В тех же условиях при нагревании изделий в воздушной среде тепловой поток варьируется в зависимости от температуры процесса.

Этап с постоянным значением температурного градиента при обработке в воздушной среде можно объяснить наличием практически постоянного значения коэффициента теплоотдачи от горячего воздуха постоянной температуры.

При обработке в паровоздушной среде на начальном этапе процесс характеризуется высоким коэффициентом теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара, который резко падает после перехода к теплоотдаче в условиях свободной конвекции. В результате после достижения максимального значения температурный градиент не сохраняется, а практически сразу начинает уменьшаться.

Последний этап аналогичен для обоих вариантов греющих сред. Он характеризуется медленным ростом температуры на поверхности в совокупности с ускоряющимся прогревом центра, что приводит к снижению температурного градиента.

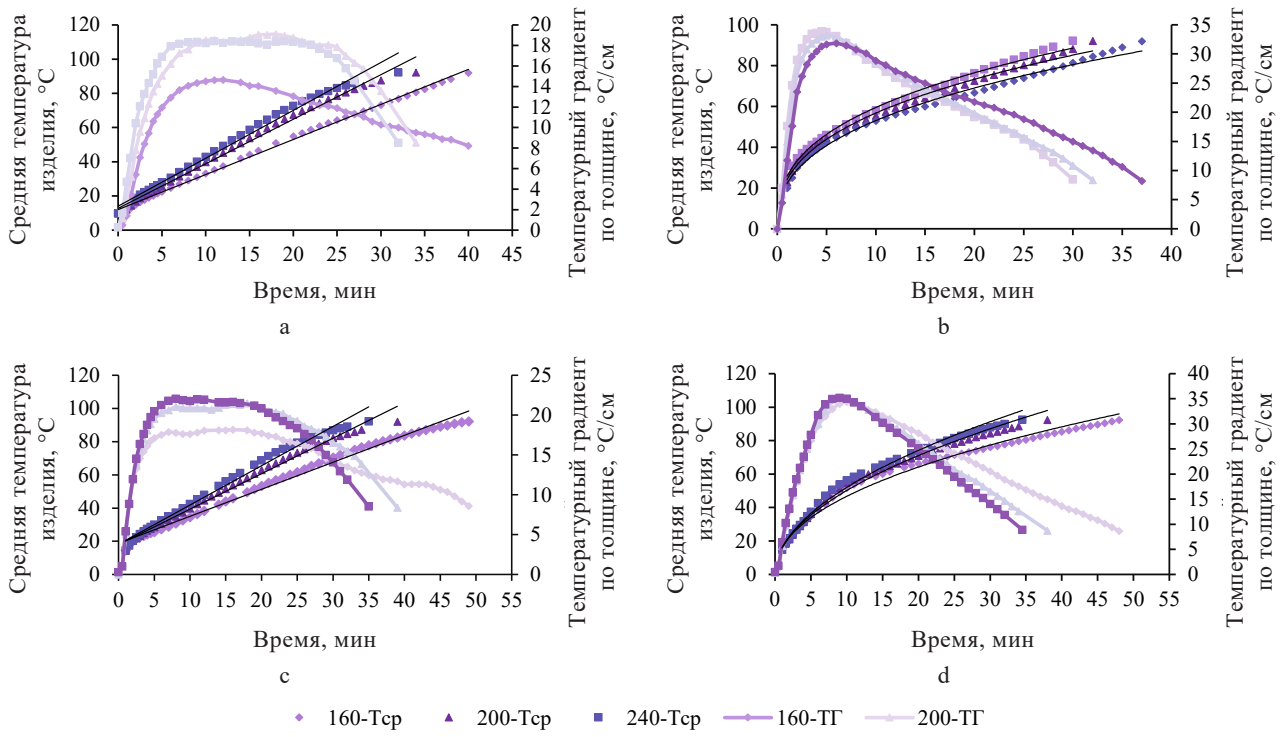
Изменение среднеобъемной температуры для изделий, обрабатываемых в паровоздушной среде, характе-



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 5. Изменение температурных градиентов (ТГ) и среднеобъемной температуры (Тср) во времени для цилиндрических изделий: a – ВОНЖ в воздушной среде; b – ВОНЖ в паровоздушной среде; c – МОВЖ в воздушной среде; d – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 5. Changes in temperature gradients and mean volume temperature over time for cylindrical products: a – low-fat wet sample in air; b – low-fat wet sample in a steam-air mix; c – high-fat slightly wet sample in air; d – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 6. Изменение температурных градиентов и среднеобъемной температуры во времени для изделий в форме пластины: a – ВОНЖ в воздушной среде; b – ВОНЖ в паровоздушной среде; c – МОВЖ в воздушной среде; d – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 6. Changes in temperature gradients and mean volume temperature over time for plate products: a – low-fat wet sample in air; b – low-fat wet sample in a steam-air mix; c – high-fat slightly wet sample in air; d – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix

ризуется степенной зависимостью и после второй минуты нагревания с достаточной степенью точности описывается уравнением степенной зависимости $\text{Тср} = b\tau^n$. Для изделий, обрабатываемых в воздушной среде, среднеобъемная температура изменяется по линейному закону и после второй минуты нагревания с высокой степенью точности описывается уравнением линейной зависимости $\text{Тср} = a + b\tau$. Различия в геометрии кривых среднеобъемной температуры связаны с характером теплообмена: постоянный во времени тепловой поток при обработке в воздушной среде и переменный во времени тепловой поток при обработке в паровоздушной среде.

Значительных различий в изменении исследуемых термометрических показателей для фаршей различного состава не выявлено. Более длительная обработка для МОВЖ обусловлена меньшим коэффициентом температуропроводности и тормозящим эффектом расплава жира.

В изменении термометрических показателей для тел различных канонических форм больших различий не выявлено.

Для анализа процесса нагревания сплошных тел термометрические зависимости целесообразно представлять в виде кривых изменения избыточной температуры в полулогарифмических координатах [4, 19]. Избыточная температура представляет собой разность между фиксированной (предельной) температурой и температурными показаниями в толще тела в данный момент времени. В качестве фиксированной температуры принята температура греющей среды в рабочей камере пароконвекционной печи.

На рисунках 7 и 8 представлены графические зависимости lg(Т–Тср) и lg(Т–ТГ) от времени обработки.

Кривые lg(Т–Тср) и lg(Т–ТГ) образуют практически параллельные линии для исследуемых условий нагрева в отношении изучаемых объектов.

Для температурных градиентов при нагревании в воздухе темп изменения сохраняется практически постоянным на всем протяжении нагревания, незначительно снижаясь и затем повышаясь. При нагревании в среде паровоздушной смеси темп изменения температурного градиента начинает резко снижаться сразу после начала нагревания, достигая минимума на 4–5 мин, после чего начинает медленно расти.

Для среднеобъемной температуры при нагревании в воздухе выделяются два участка с различным темпом изменения: в течение первых 5 мин темп невысокий,

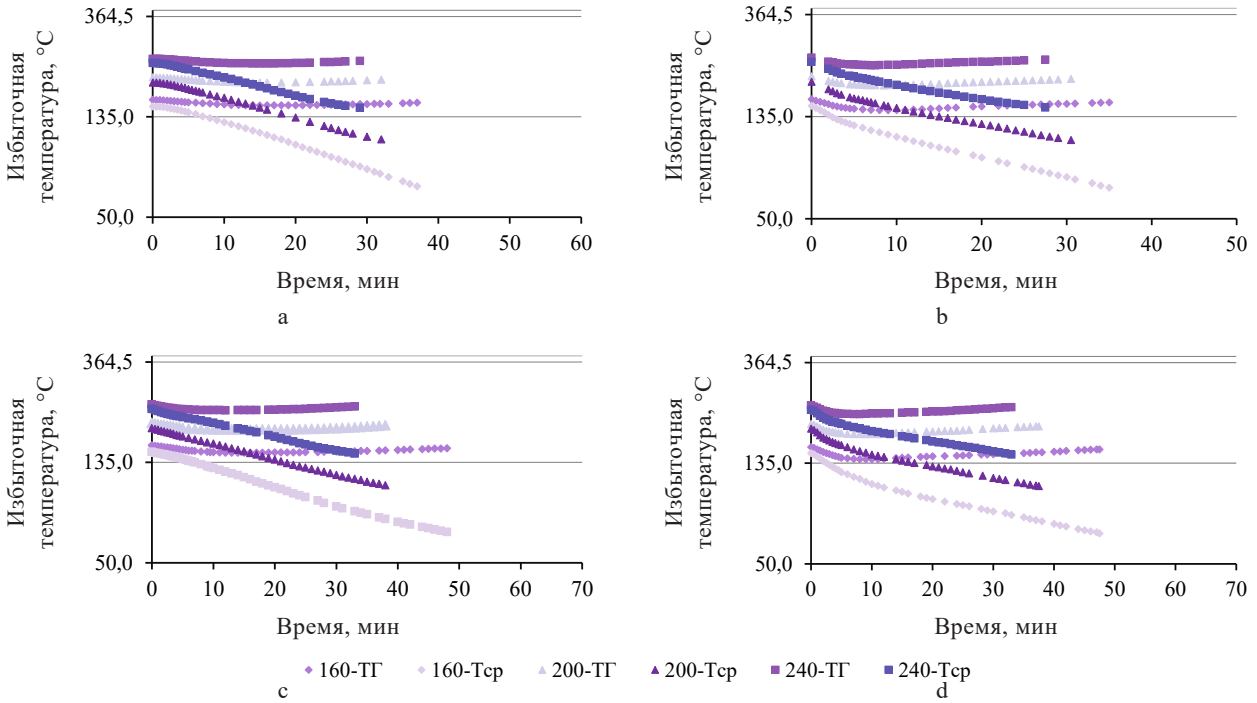
после 5 мин темп повышается, сохраняя новое значение до конца нагревания. При нагревании в среде паровоздушной смеси характерен высокий темп изменения в течение первых 5 мин, после чего он резко снижается, сохраняя новое значение до конца нагревания.

Наблюдаемые отличия протекания процесса нагревания в исследуемых теплообменных средах можно объяснить особенностями теплоподвода к внутреннему влажному телу продукта в течение процесса нагревания. При обработке в среде паровоздушной смеси на начальном этапе при температуре поверхности ниже температуры насыщения водяного пара процесс теплообмена интенсифицируется за счет конденсационных превращений. При обработке в среде нагретого воздуха величина теплового потока на протяжении всего процесса сохраняется практически постоянной. Операции жарки и запекания мясопродуктов в среде паровоздушной смеси можно классифицировать как процесс термообработки с падающим теплоподводом, а в воздушной среде как процесс термообработки с постоянным теплоподводом.

Анализ графических зависимостей показывает, что после 10 мин нагревания кривые lg(T–Tср) и lg(T–TГ) для всех исследуемых вариантов выражаются прямыми линиями. Это свидетельствует о наступлении регулярного режима теплопроводности по объему продуктов.

Приведенные на рисунках 1–4 графические зависимости показывают, что изделия с низким содержанием жира (куриное филе), по сравнению с маловлажными изделиями высокой жирности (лопаточная часть свинины) одинаковой формы, прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной смеси и на 9–23 % в нагретом воздухе. Применение паровоздушной смеси для жарки изделий из куриного мяса приводит к выраженному сокращению продолжительность термообработки (на 5–8 %), в то время как для изделий из свиного мяса оно незначительно (0–2,5 %). Более высокая продолжительность термообработки для изделий из свинины объясняется более низкой теплопроводностью материала, меньшим содержанием влаги и высоким количеством жира, плавление которого тормозит теплообменные процессы. На характер изменения термометрических показателей, согласно рисункам 5–8, нутриентный состав выраженного влияния не оказывает. Коэффициент температуропроводности изменяется соответственно температурному росту, а тепловые колебания теплофизических характеристик биологического материала являются результатом изменения нативной структуры нутриентов.

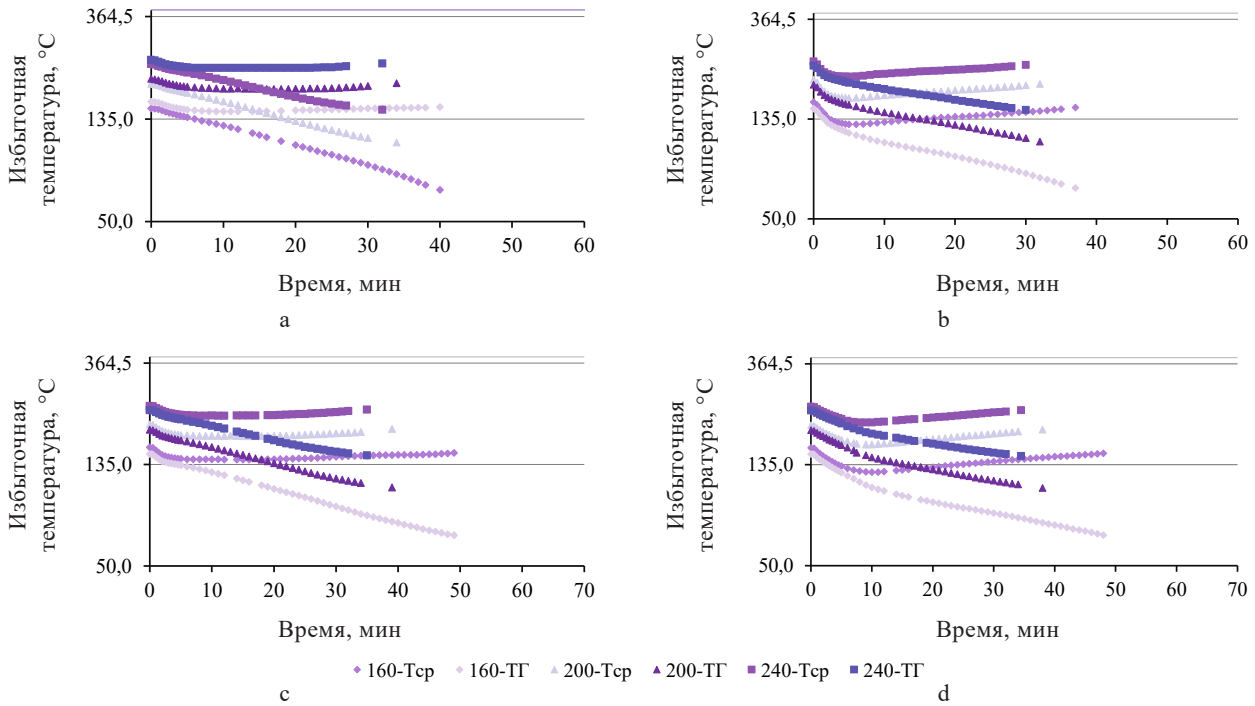
Для изделий в форме пластины характерна более длительная термообработка, обусловленная особенностями нагревания тел соответствующей стереометриче-



Примечание: 160-Tср, 200-Tср, 240-Tср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 7. Изменение lg(T–Tср) и lg(T–TГ) во времени для изделий в форме цилиндра: a – ВОНЖ в воздушной среде; b – ВОНЖ в паровоздушной среде; c – МОВЖ в воздушной среде; d – МОВЖ фарш в паровоздушной среде

Figure 7. lg (temperature – mean temperature) and lg (temperature – temperature gradient) for cylindrical products: a – low-fat wet sample in air; b – low-fat wet sample in a steam-air mix; c – high-fat slightly wet sample in air; d – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 8. Изменение lg(Т–Тср) и lg(Т–ТГ) во времени для изделий в форме пластин: a – ВОНЖ в воздушной среде; b – ВОНЖ в паровоздушной среде; c – МОВЖ в воздушной среде; d – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 8. lg (temperature – mean temperature) and lg (temperature – temperature gradient) for plate products: a – low-fat wet sample in air; b – low-fat wet sample in a steam-air mix; c – high-fat slightly wet sample in air; d – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix

ской формы и характером обтекания их конвективными потоками. На характер изменения термометрических показателей процесса стереометрическая форма выраженного влияния не оказывает.

Выводы

Изготовление изделий в виде одномерных тел канонических форм позволяет провести обобщающие исследования, результаты которых распространяются на всю номенклатуру кулинарных изделий, представляющих собой тела ограниченных размеров.

Получили графические зависимости $\left(\frac{\partial T}{r}\right)$ для цилиндрических изделий и $\left(\frac{\partial T}{h}\right)$ для изделий в форме пластины, которые можно использовать для подбора оптимальных режимных параметров жарки мясных изделий в производственных условиях.

Для процесса жарки в паровоздушной среде изменение температурных градиентов (ТГ) имеет следующий характер: рост в течение первых 5–7 мин нагревания; достижение максимума; постепенное снижение. Для процесса жарки в воздушной среде изменение ТГ имеет следующий характер: рост в течение первых 7–10 мин; достижение максимума; сохранение практически постоянной величины в течение 10–15 мин; постепенное снижение. Темп изменения ТГ при нагревании в паровоздушной среде резко снижается после начала нагревания, достигая минимума на 4–5 мин, после чего начинает медленно расти. Темп изменения ТГ при нагревании в воздушной среде сохраняется практически постоянным на всем протяжении нагревания, незначительно снижаясь и затем повышаясь.

Изделия с низким содержанием жира, по сравнению с маловлажными изделиями высокой жирности одинаковых форм, прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной среде и на 9–23 % в воздушной среде. Применение паровоздушной среды для жарки изделий из куриного мяса приводит к выраженному сокращению продолжительности термообработки (на 5–8 %), в то время как для изделий из свиного мяса оно незначительно (0–2,5 %). Данные наблюдения следует учитывать при разработке новых и оптимизации существующих технологических инструкций и рецептур.

На характер изменения термометрических показателей нутриентный состав и стереометрическая форма выраженного влияния не оказывают. Изменение величины среднеобъемной температуры (Тср) для изделий, обрабатываемых в паровоздушной среде, характеризуется степенной зависимостью, и после второй минуты нагревания оно может быть описано уравнением вида $\text{Тср} = b\tau^n$. Для изделий, обрабатываемых в воздушной среде, величина Тср изменяется по линейному закону

и после второй минуты нагревания может быть описана уравнением вида Tср = $a + b\tau$. Кривые lg(T–Tср) и lg(T–ТГ) образуют практически параллельные линии для всех исследуемых вариантов и после 10 мин нагревания выражаются прямыми линиями. Это свидетельствует о наступлении регулярного режима теплопроводности по объему продуктов. Полученные зависимости могут быть применены для прогнозирования Tср и ТГ мясных рубленых изделий различного нутриентного состава и стереометрических форм при термообработке в пароконвекционных печах при различных температурно-влажностных режимах ведения процесса.

Критерии авторства

М. Н. Смагина: обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), проведение экспериментов, формирование выводов, написание и редактирование текста рукописи, оформление рукописи. Д. А. Смагин: научное руководство, проведение критического анализа материалов, обобщение результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.N. Smagina developed the research concept and objectives, conducted the experiments, drew conclusions, designed and wrote the draft, and proofread the text. D.A. Smagin supervised the research, analyzed the materials, summarized the results, and revised the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Agafonychev VP, Makhonina VN. Calculation methods in the meat and egg sausages technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1052. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012058

2. Jain A. The role of thermal effusivity in heat exchange between finite-sized bodies. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023;202. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123721

3. Brazhnikov AM. Theory of heat treatment of meat products. Moscow: Agropromizdat; 1987. 271 p. (In Russ.). [Бражников А. М. Теория термической обработки мясопродуктов. М.: Агропромиздат, 1987. 271 с.].

4. Glagoleva LE, Zatsepilina NP, Kopylov MV, Nesterenko IV. Calculation of the process duration of thermo-moisture treatment of semi-finished products based on animal and vegetable raw materials. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018;80(2):51–57. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57

5. Li J, Deng Y, Xu W, Zhao R, Chen T, Wang M, *et al.* 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 and Technology. 2023;131:31–45. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018

6. Kubo MTK, Baicu A, Erdogdu F, Poças MF, Silva CLM, Simpson R, *et al.* Thermal processing of food: Challenges, innovations and opportunities. A position paper. Food Reviews International. 2021;39(6):3344–3369. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012789

7. Moya J, Lorente-Bailo S, Salvador ML, Ferrer-Mairal A, Martínez MA, Calvo B, *et al.* Development and validation of a computational model for steak double-sided pan cooking. Journal of Food Engineering. 2021;298. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110498

8. Nelson H, Deyo S, Granzier-Nakajima S, Puente P, Tully K, Webb J. A mathematical model for meat cooking. The European Physical Journal Plus. 2020;135. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00311-0

9. Rabeler F, Feyissa AH. Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. Journal of Food Engineering. 2018;237:60–68. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021

10. Rocca-Poliméni R, Zárate Vilet N, Roux S, Bailleul J-L, Broyart B. Continuous measurement of contact heat flux during minced meat grilling. Journal of Food Engineering. 2019;242:163–171. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.032

11. Skrypnyk VO, Farisieiev AG. Analytical model of heat treatment of meat products with high content of connective tissue in vacuum termopackets. Journal of Chemistry and Technologies. 2019;27(2):201–211. (In Ukrainian). https://doi.org/10.15421/081920

12. Kumari S, Samanta SK. The efficient thermal processing of cylindrical multiphase meat: a study on the selection of microwave heating strategy. International Journal of Food Engineering. 2022;18(6):437–450. https://doi.org/10.1515/ijfe-2021-0255

13. Cheng Y, Wang S, Ju S, Zhou S, Zeng X, Wu Z, *et al.* Heat-treated meat origin tracing and authenticity through a practical multiplex polymerase chain reaction approach. Nutrients. 2022;14(22). https://doi.org/10.3390/nu14224727

14. Gurinovich GV, Khrenov VA, Patrakova IS, Patshina MV. Studying an effect of thermal treatment methods on physico-chemical properties of beef depending on aging technology. Food Systems. 2022;5(4):376–382. (In Russ.). https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-376-382

15. Kaltovich IV. Rational process parameters of chopped semi-finished products production using emulsions from collagen-containing raw materials. Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials. 2020;(14):199–213. (In Russ.). https://doi.org/10.47612/2220-8755-2019-14-199-213

16. Tsaregorodtseva EV. Effect of the method of heat treatment on the quality of finished meat products. Current Issues of Agricultural Production and Processing. 2021;(23):234–237. (In Russ.). [Царегородцева Е. В. Влияние способа тепловой обработки на качество готовых мясных продуктов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2021. № 23. С. 234–237.]. https://www.elibrary.ru/IONVNA

17. Smagina MN, Smagin DA, Smolyak AA. Influence of changes in the thermal characteristics of the material on the heating process of minced meat products. Food Industry: Science and Technologies. 2020;13(4):61–69. (In Russ.). https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69

18. Smagina MN, Smagin DA. Heat exchange in wet capillary-porous bodies of various compositions during convective heating in vapor-air media. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series. 2023; 68(2):137–147. (In Russ.). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148

19. Ginzburg AS, Gromov MA, Krasovskaya GI. Thermophysical characteristics of food products. Moscow: Pishchevaya promyshlennost′; 1980. 288 p. (In Russ.). [Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.].

20. Skurikhin IM, Tutel′yan VA. Chemical composition of Russian food products. Moscow: DeLi print; 2002. 235 p. (In Russ.). [Скурихин И. М., Тутельян В. А. Химический состав российских пищевых продуктов. М.: ДеЛи принт, 2002. 235 с.].