

# ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 536.2:637.5

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЯСНОГО ФАРША ПРИ ЗАПЕКАНИИ В КОНВЕКТОМАТАХ

*М. Н. Смагина, А. А. Смоляк, Д. А. Смагин, Е. Р. Терешкова*

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальность работы обусловлена необходимостью создания параметрической модели, позволяющей прогнозировать температурное поле поверхности изделий из мясного фарша при запекании в конвектоматах и ротоматах. Цель исследования – оптимизация размещения изделий из мясного фарша по объему рабочей камеры, обеспечивающей равномерность температурного поля поверхности. Научная задача – создание и оценка эффективности компьютерной модели, описывающей температурное поле поверхности изделий из мясного фарша при запекании в аппаратах с вынужденным движением теплоносителя.

**Материалы и методы.** Метод параметрического моделирования с использованием программного модуля Solidworks Flow Simulations при заданных граничных условиях процесса, режимных параметрах базового аппарата и физических свойствах исследуемого продукта. Оценка применимости разработанной модели оценивалась экспериментальным путем; исследования по распределению температурного поля проводились на изделиях из модельного тела.

**Результаты.** Создана параметрическая модель, характеризующая температурное поле поверхности изделий из мясного фарша при нагревании в аппаратах с вынужденной циркуляцией греющей среды. Применимость модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

**Заключение.** Разработанная компьютерная модель эффективно описывает распределение температур по поверхности нагреваемых пищевых продуктов и может быть применена в практической деятельности предприятий пищевой промышленности и общественного питания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** процесс; моделирование; модель; оптимизация; температурное поле; нагревание; поверхность; конвекция; запекание; мясной фарш; конвектомат.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Смагина, М. Н. Компьютерное моделирование температурного поля поверхности изделий из мясного фарша при запекании в конвектоматах // М. Н. Смагина, А. А. Смоляк, Д. А. Смагин, Е. Р. Терешкова // Вестник МГУП. – 2021. – № 1(30). – С. 63–74.

## COMPUTER SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE SURFACE OF MINCED MEAT PRODUCTS WHEN BAKED IN CONVECTOMATS

*M. N. Smagina, A. A. Smolyak, D. A. Smagin, E. R. Tereshkova*

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

## ABSTRACT

**Introduction.** The relevance of the work is due to the need to create a parametric model that allows us to predict the temperature field of the surface of minced meat products when baked in convectomats and rotomats. The aim of the study is to optimize the placement of minced meat products in the volume of the working chamber, which ensures the uniformity of the surface temperature field. The scientific task is to create and evaluate the effectiveness of a computer model that describes the temperature field of the surface of minced meat products when baked in apparatuses with forced movement of the heat-transfer agent.

**Materials and methods.** The method of parametric modeling using the software module Solidworks Flow Simulations under the specified boundary conditions of the process, the operating parameters of the basic apparatus and the physical properties of the product under study. The applicability of the developed model was evaluated experimentally; studies on the distribution of the temperature field were carried out with products made of the model body.

**Results.** A parametric model that characterizes the temperature field of the surface of minced meat products when heated in devices with forced circulation of the heating medium has been created. The applicability of the model is confirmed by experimental studies.

**Conclusion.** The developed computer model effectively describes the temperature distribution over the surface of heated food products and can be applied at food industry enterprises and public catering establishments.

**KEY WORDS:** *process; simulation; model; optimization; temperature field; heating; surface; convection; baking; minced meat; convectomat.*

**FOR CITATION:** Smahina M. N., Smolyak A. A., Smahin D. A., Tereshkova E. R., Computer simulation of the temperature field of the surface of minced meat products when baked in convectomats. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. – 2021. – № 1(30). – P. 63–74 (in Russian).

## ВВЕДЕНИЕ

Потребительские показатели запеченных мясных изделий во многом характеризуются колерованием корки. Поэтому при разработке производственных технологий и рецептов особенно важно заранее планировать какое распределение температур будет наблюдаться по поверхности продукта в течение тепловой обработки. Особенно данная задача актуальна в современный период при массовом внедрении в производственный процесс тепловых аппаратов с вынужденной циркулирующей греющей среды (конвектоматы и ротоматы).

Предшествующие исследователи провели значительный объем работ по моделированию процесса нагревания мясных продуктов. Однако, большинство подобных работ касались теплообменных процессов внутренних слоев [1–3]; моделированию процесса нагревания поверхностных слоев посвящено сравнительно немного исследований, моделирование нагревания непосредственно поверхности проводилось фрагментарно. Научные работы по моделированию нагревания поверхности изделий из мясного фарша сведены в большинстве к определению усредненной температуры корки; практически не рассматривались аспекты распределения температур по внешней площади. Подобный вопрос не представлял научного интереса при моделировании теплообмена с точки зрения теплотехники процесса, но с точки зрения технологии пищевых производств возможность прогнозирования равномерности температурного поля поверхности представляет значительный интерес, поскольку определяет потребительские характеристики готовой продукции.

В настоящее время для теоретического описания технологических процессов активно применяется компьютерное моделирование. Основными преимуществами данного метода исследования является экономичность, наглядность, сокращение затрат времени на проведение традиционного математического моделирования. Наиболее перспективным для моделирования тепловых процессов является программный модуль SolidWorks Flow Simulation.

Проблемой, возникающей при моделировании тепловых процессов пищевых производств, является предназначение SolidWorks Flow Simulation для моделирования процессов нагревания твердых тел. Между тем, протекание теплообменных процессов в ходе реализации поверхностных способов тепловой обработки пищевых продуктов значительно отличается от нагревания твердых тел. Термообработка биологических материалов сопровождается слож-

ным комплексом взаимосвязанных физико-химических, тепломассообменных, биохимических и других процессов, протекающих в массе продукта при подводе теплоты от поверхностных слоев [4, 5]. 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. Поэтому возникает задача адаптации SolidWorks Flow Simulation для моделирования процесса нагревания поверхностных слоев мясных изделий.

Объект исследования – методы моделирования тепловых процессов, протекающих при нагревании поверхностных слоев изделий из мясного фарша.

Цель исследования – оптимизация размещения изделий из мясного фарша по объему рабочей камеры, обеспечивающей равномерность температурного поля поверхности.

Научная задача – создание и оценка эффективности компьютерной модели, описывающей температурное поле поверхности изделий из мясного фарша при запекании в аппаратах с вынужденным движением теплоносителя.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе компьютерного моделирования применялся программный модуль SolidWorks Flow Simulation, предназначенный для газо- и гидродинамического анализа, а также тепловых расчетов на принципе компьютерного моделирования вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics имитирует теплоноситель, проходящий вокруг объекта). Модуль удобен для общего параметрического моделирования потока, для чего применяется метод конечного объема (FVM) [6, 7]. Тепловые расчеты в данной программе базируются на математических зависимостях для процессов внешнего теплообмена конвективной теплоотдачи в рабочей камере теплового аппарата и процессов внутреннего теплообмена нестационарной теплопроводности при нагревании твердых тел. Температура по площади внешней поверхности изделия определяется уравнением, описывающим нестационарное температурное поле в процессе нагревания в теплоносителе с постоянной температурой, представляющее собой сумму бесконечного ряда, члены которого расположены по быстро убывающим экспоненциальным функциям [8, 9]:

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

где  $A$ ,  $U$  – табличные функции;

$\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $\mu - \mu(Bi)$ , значения  $\mu(Bi)$  табулированы [8].

Моделирование проводилось для изделий в виде безграничного цилиндра. Данная форма позволяет провести корректный теплотехнический эксперимент, ее вариации распространены в производственной практике, а на основе полученных результатов можно будет предлагать решения для тел ограниченных размеров, являющихся частными случаями сочетания безграничных форм. Значительная длина по отношению к диаметру для бесконечного цилиндра позволяют полномерно оценить распределение температур по всей площади поверхности изделий. Размещение заготовок принято вертикальное для обеспечения эффективной гидродинамики процесса. Поперечно-омываемый круговой цилиндр при данном расположении представляет собой неудобообтекаемое тело, позволяя более полно оценить влияние различных факторов на нагревание отдельных участков поверхности.

При моделировании тепловых процессов на поверхности мясных изделий, протекающих при запекании в конвекционных аппаратах, решены следующие задачи:

– проведены предварительные экспериментальные исследования особенностей протекания процесса конвективного теплообмена в рабочей камере базового аппарата (за базовый аппарат принят конвектомат Unox-203G, унифицированный под типоразмер GN 2/3

по системе Gastronorm; данный типоразмер наиболее распространен в производственной практике);

- создана параметрическая модель, воспроизводящая конструктивные особенности и режимные параметры базового аппарата;
- разработан проект в SolidWorks Flow Simulation, по которому изучены характер движения конвективных потоков в камере и тепловые процессы при нагревании модельных тел;
- проведена обработка полученных результатов моделирования;
- проведена экспериментальная оценка эффективности моделирования.

В ходе предварительных экспериментальных исследований для измерения скоростей конвективного потока и давления по объему рабочей камеры базового аппарата использовался измерительный прибор Testa 435-4.

Для оценки эффективности разработанной модели проводились экспериментальные исследования, заключающиеся в измерении температурного поля поверхности обрабатываемых изделий в базовом аппарате. Изделия формовались в виде безграничного цилиндра в марлевой оболочке и помещались в специальные стержневые кассеты, позволяющие в каждом опыте строго соблюдать форму, габаритные размеры и массу полуфабриката и обеспечивать прямой контакт поверхности с греющей средой.

Экспериментальную проверку эффективности моделирования процессов теплообмена поверхности пищевых продуктов проводили на изделиях из модельного тела. Применение модельного тела для изучения процессов теплообмена обеспечивает удешевление научных исследований, повторяемость физических характеристик исследуемого материала, ускоряет процесс подготовки, дает возможность более полно выявить закономерности изучаемого процесса.

В качестве предварительного модельного тела применяли высушенную гипсовую заготовку. При выборе материала учитывали близость теплофизических характеристик (теплопроводность гипса формованного сухого  $0,43 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$  [10], что соответствует среднему значению большинства пищевых продуктов [11, 12]. В ходе нагревания гипсовая заготовка не изменяет формы и размеров, не образуются поверхностные корки, физико-химические процессы практически отсутствуют, что обеспечивает точность и повторяемость эксперимента.

В качестве основного модельного тела применяли смесь опилки–глина–вода по методу Косого–Желудкова. Модельное тело имело следующий состав: опилки – 13,4 %; глина – 11,6 %; вода – 75 %. Проведенные ранее исследования показали, что данное модельное тело обладает физическим строением (коагуляционная структура), реологическими, технологическими и теплофизическими свойствами, близкими к мясным фаршам [13] и может быть применено для определения конечных температур по площади внешней поверхности изделий из мясного фарша в форме бесконечного цилиндра для времени, что определяет достижение кулинарной готовности.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Создание параметрической модели процесса базировалось на геометрической модели, воспроизводящей конструктивные особенности конвекционного аппарата для типоразмера GN 2/3 по системе Gastronorm [14, 15]. В разработанную модель вводились режимные параметры изучаемого процесса:

- единицы измерения по системе СИ;
- тип задачи и физическая модель (внутренняя задача, нестационарный процесс нагревания);
- характеристики текучей среды (принимались для нагретого воздуха);
- физические характеристики исследуемого материала;
- термодинамические параметры теплоносителя;
- параметры турбулентности теплоносителя;
- начальные и граничные условия процесса;

- массовый расход теплоносителя;
- давление по объему рабочей камеры с учетом имитации теплового «стока» в задней стенке;
- скорости конвективного потока;
- уровень разрешения;
- условия на стенках (стенки рабочей камеры приняты условно гладкими без учета шероховатости).

При построении модели проводились предварительные экспериментальные исследования особенности протекания процесса конвективного теплообмена в рабочей камере базового аппарата. Замерялись скорости и давление конвективных потоков в определяющих точках по объему рабочей камеры. Замеры осуществлялись в зоне размещения пищевых продуктов в передней, центральной и задней плоскостях камеры; при проведении замеров в крайних позициях отступали на 5 см от стенок и дверцы.

Согласно полученным данным конвективный поток характеризуется наиболее высокими значениями скоростей в центральной части камеры с возрастанием от входа (3,2...3,5 м/с) к середине (3,6...3,9 м/с) и далее к выходу (перед выходом свыше 4,0 м/с). Средняя скорость в зоне размещения продуктов составляет 3,5...3,9 м/с.

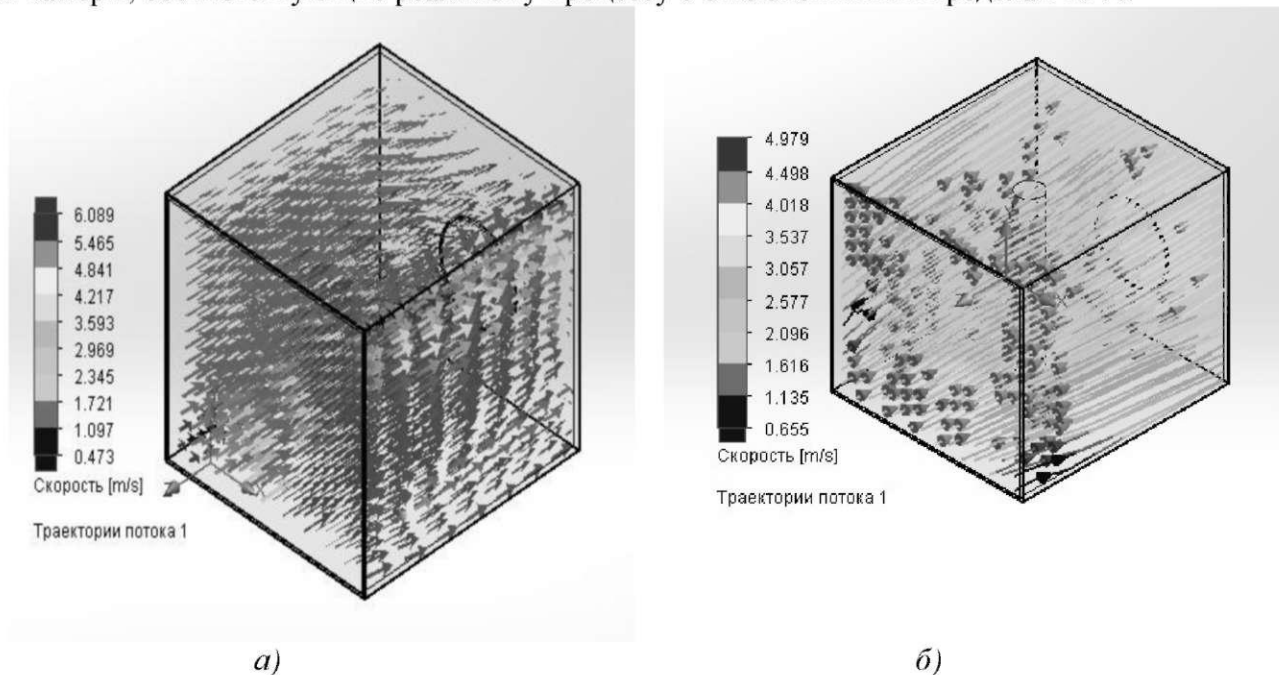
Около стенок камеры конвективный поток характеризуется более низкими скоростями (менее 3 м/с, достигая непосредственно у стенок минимального значения около 1,5 м/с); данная зона не является рабочей.

Давление в рабочей камере в передней плоскости равно атмосферному (101320 Па), вблизи задней стенки давление незначительно падает примерно до 100000 Па.

Расчетный расход теплоносителя на входе, исходя из габаритных размеров рабочей камеры и скорости конвективных потоков, составляет приблизительно 0,33 кг/с.

Результаты компьютерного моделирования распределения конвективных потоков для незагруженной рабочей камеры и при обтекании одиночной цилиндрической заготовки приведены на рис. 1.

Компьютерная модель имеет скорости конвективного потока в контрольных точках рабочей камеры, соответствующие реальному процессу с отклонениями в пределах 15 %.



а)

б)

а – незагруженная рабочая камера;

б – при обтекании одиночной заготовки в виде безграничного цилиндра

Рис. 1. Модельное распределение конвективных потоков

Fig. 1. Model distribution of convective flows

Полученное при моделировании движение теплоносителя в незагруженной камере можно классифицировать как вынужденное ламинарное течение по параллельным линиям без смешивания между собой.

При моделировании конвективной обработки одиночного безграничного цилиндра в лобовой части заготовки наблюдается вынужденное ламинарное течение, характерное для моделирования процесса в незагруженной камере. Линии тока за цилиндром расходятся. Ламинарный пограничный слой, образующийся на передней половине цилиндра, отрывается от поверхности в миделевой части цилиндра и позади цилиндра образуются симметричные вихри. Вихри уносятся конвективным потоком, образуя за цилиндром вихревую дорожку. Отрыв пограничного слоя является следствием возрастания давления вдоль потока и подторможивания движения среды твердой стенкой. При обтекании передней половины цилиндрической заготовки сечение потока уменьшается, в результате чего статическое давление увеличивается, так как здесь скорость уменьшается.

Компьютерное моделирование показало значительное образование возвратных и вихревых конвективных потоков, характерное для переходного режима конвективного обтекания кругового цилиндра. Такое многообразие режимов течения значительно усложняет процесс нагревания поверхности заготовки.

Полученные в ходе теоретических исследований данные соответствуют теории нагревания одиночного поперечно-обтекаемого цилиндра для переходного режима, характеризуемого диапазоном  $10^3 < Re < 2 \times 10^5$  [9], который включает характерные для исследуемого аппарата значения  $Re = 6 \dots 8,5 \times 10^3$ .

Для моделирования тепловых процессов определяли коэффициент теплоотдачи от греющей среды к поверхности нагреваемых тел.

Для исследуемых режимных параметров при расчетном значении  $Re = 6 \dots 8,5 \times 10^3$  теплоотдача на поверхности нагреваемых тел определяется уравнением [8, 9]:

$$\overline{Nu}_{\text{жсд}} = 0,25 Re_{\text{жсд}}^{0,6} Pr_{\text{жс}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (2)$$

Из полученного значения числа Нусельта находили значение коэффициента конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda}{l}. \quad (3)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяли из уравнения

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon C_0}{t_{\text{жс}} - t_n} \left[ \left( \frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon$  – степень черноты;

$T_{\text{жс}}$  и  $T_n$  – соответственно абсолютная температура теплоносителя и средняя температура поверхности изделия, К;

$t_{\text{жс}}$  и  $t_n$  – соответственно средняя температура теплоносителя и поверхности изделия, °С.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Для оценки эффективности полученной модели проводили проверочные экспериментальные исследования на гипсовых заготовках в виде цилиндра с размерами  $d \times h = 50 \times 320$  мм, предварительно высушенные в сушильной камере. Данное модельное тело не является влажным телом и исключает влияние массообменных процессов. Время нагревания в предвари-

тельных исследованиях принято 5 минут, поскольку согласно проведенным расчетам для твердого тела с данными теплофизическими характеристиками при дальнейшем нагревании поверхность заготовки может практически равномерно прогреться до температуры греющей среды.

Результаты исследований приведены в табл. 2.

**Табл. 1.** Определение коэффициента теплоотдачи

**Table 1.** Determination of the heat transfer coefficient

$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$	$\alpha_{л}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$
160	29,57	6,95	36,52
180	29,31	7,54	36,85
200	29,20	8,16	37,36

**Табл. 2.** Результаты проверочных исследований на гипсовой заготовке

**Table 2.** Results of verification studies on the gypsum billet

Лобовая часть	Левая часть	Кормовая часть	Правая часть
результаты теоретических исследований			
115...130 по всей длине, перегрев по центру, недогрев на периферии	110..125 по всей длине, перегрев по центру, недогрев на периферии	105...112 по всей длине, в целом равномерно, небольшой перегрев по центру со стороны лобовой части	105...115 по всей длине, в целом равномерно, небольшой перегрев по центру со стороны лобовой части
результаты экспериментальных исследований, $^\circ\text{C}$			
110...120 по всей длине, перегрев по центру, недогрев на периферии	108..117 по всей длине, перегрев по центру, недогрев на периферии	100...105 по всей длине, в целом равномерно, небольшой перегрев по центру со стороны лобовой части	102...107 по всей длине, в целом равномерно, небольшой перегрев по центру со стороны лобовой части

Из табл. 2 видно, что моделирование процесса соответствует реальному процессу, показывая характерное распределение температур различных участков поверхности нагреваемого тела. Различия результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований обусловлены тем, что расчетные значения характеристик исследуемого материала принимались по справочным данным, допускающими колебания по сравнению с реальным объектом.

Дальнейшие исследования проводили для получения картины температурного распределения по поверхности изучаемых изделий. Продолжительность нагревания принимали равным 35 минут [4], что соответствует времени наступления кулинарной готовности для изучаемых изделий.

Полученная в ходе моделирования картина распределения температурных полей полностью соответствует результатам экспериментальных исследований.

Максимальные значения температуры поверхности наблюдаются в лобовой части, чуть в меньшей степени нагревается левая часть, далее по интенсивности нагревания следует правая часть, минимальные значения температур характерны для кормовой части. По высоте заготовки наибольшие температуры наблюдаются на центральных участках для всех частей. Результаты моделирования соответствуют теории нагревания одиночного поперечно-обтекаемого цилиндра для переходного режима.

Абсолютные значения температур значительно различаются. Так, при температуре греющей среды  $t_{ср} = 180 ^\circ\text{C}$  (рис. 2) по компьютерной модели температурные значения варьируются в диапазоне от  $142 ^\circ\text{C}$  (периферийные участки кормовой части) до  $158 ^\circ\text{C}$  (центральный

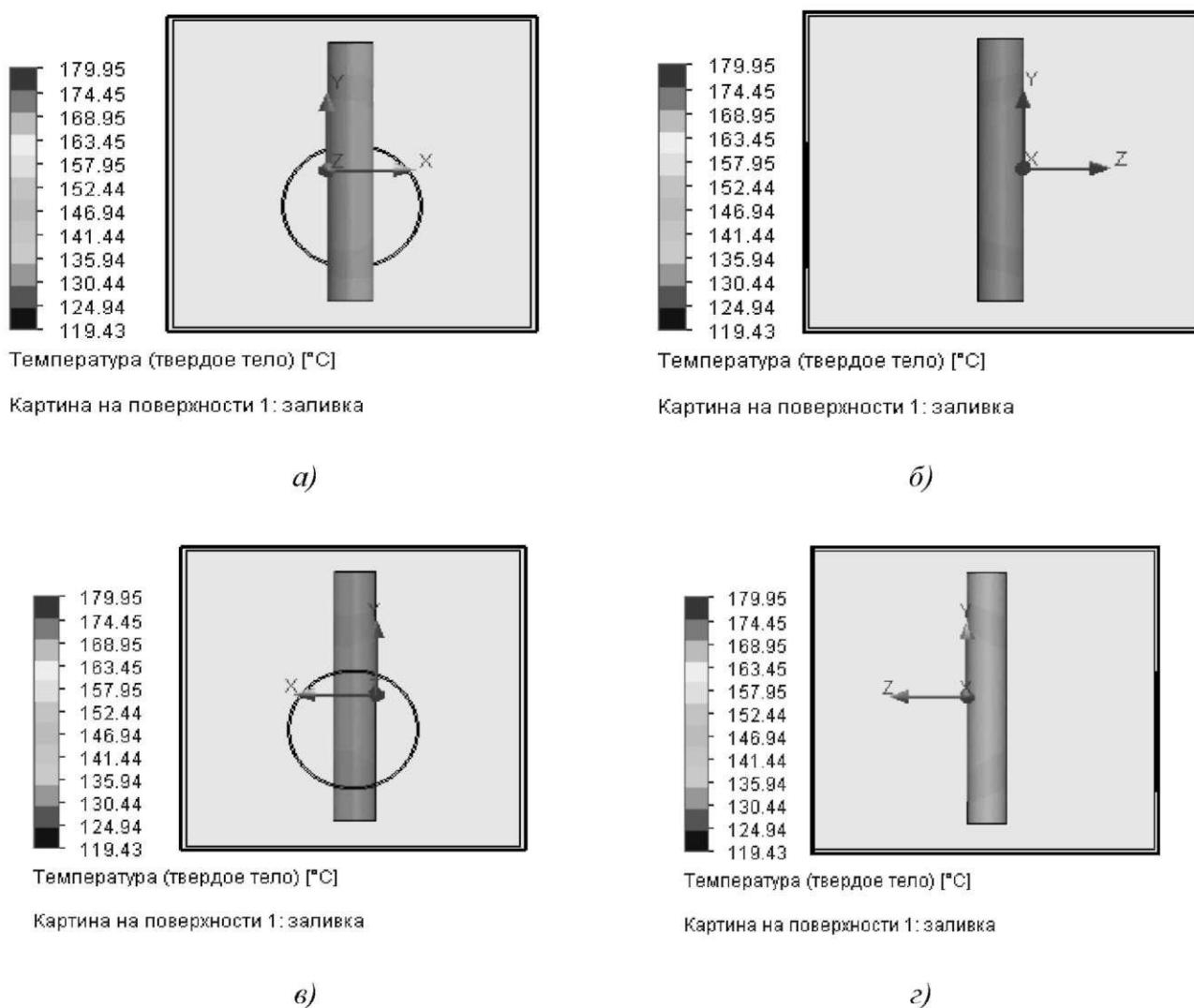
участок лобовой части).

Согласно экспериментальным данным предельные температурные значения для аналогичных участков составляют 103–114 °С.

Отличие значений абсолютной температуры в теоретических исследованиях от результатов экспериментальных исследований обусловлено тем, что программный модуль не учитывает протекающие массообменные процессы (наличие процессов диффузии влаги из поверхностных слоев изделия в окружающую среду и сопутствующего охлаждения поверхности в ходе испарения избыточной влаги).

Компьютерное моделирование, таким образом, адекватно отражает общую картину распределения температур, отличаясь в абсолютных значениях.

На следующем этапе проводили исследования процесса нагревания в исследуемом аппарате для одиночных изделий при различных температурах греющей среды.



*a* – вид спереди; *б* – вид слева; *в* – вид сзади; *з* – вид справа

**Рис. 2.** Результаты теоретических исследований распределения температуры по поверхности одиночных цилиндрических изделий ( $t_{cp} = 180\text{ °C}$ )

**Fig. 2.** Results of theoretical studies of the temperature distribution over the surface of single cylindrical products ( $t_{average} = 180\text{ °C}$ )



Согласно результатам экспериментальных исследований для  $t_{cp} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  общая картина температурного распределения по поверхности изделий аналогична результатам компьютерного моделирования для данных режимных параметров, также различаясь в абсолютных температурных значениях.

Сравнение температурных перепадов по поверхности показано в табл. 3.

**Табл. 3.** Сравнение температурных перепадов

**Table 3.** Comparison of temperature differences

Исследуемые параметры	По результатам теоретических исследований	По результатам экспериментальных исследований
при температуре греющей среды $t_{cp} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	138	104
Минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	125	94
Температурный перепад, $^{\circ}\text{C}$	13	10
при температуре греющей среды $t_{cp} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	158	115
Минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	142	103
Температурный перепад, $^{\circ}\text{C}$	16	12
при температуре греющей среды $t_{cp} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Максимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	177	127
Минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$	152	105
Температурный перепад, $^{\circ}\text{C}$	25	22

Однако, несмотря на различия в абсолютных значениях температур, расчетные величины температурного перепада по поверхности изделий по результатам моделирования и по результатам экспериментальных исследований характеризуются близкими значениями.

Таким образом, предлагаемый способ моделирования может быть применен не только для описания распределения температурного поля поверхности, но и для установления величины температурного перепада.

Далее проводили теоретические исследования процесса нагревания поверхности изделий при групповом размещении.

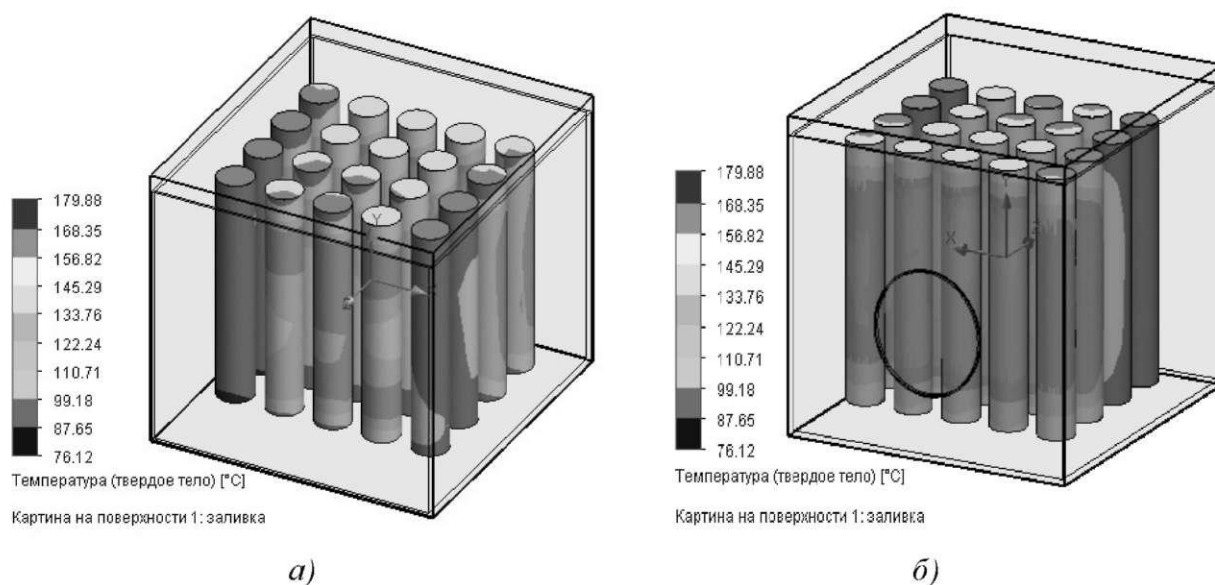
Температуру греющей среды принимали  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как наиболее эффективную по итогам предыдущих исследований (оптимальное значение, позволяющее обеспечить высокие потребительские характеристики готовой продукции при достаточно низком температурном перепаде).

На начальном этапе исследования проводили для группового размещения с небольшим количеством изделий (от 3 до 7) при различной компоновке.

Моделирование показало, что увеличение количества изделий и способ размещения усложняют картину распределения температур поверхности изделий. Наблюдаемое в компьютерной модели распределение конвективных потоков при групповом размещении изделий соответствует теории конвективного теплопереноса.

При полной загрузке рабочей камеры исследовали основные варианты размещения нагреваемых изделий; наблюдаемый в модели характер распространения конвективных потоков соответствует теории конвективного теплопереноса при данных значениях числа Рейнольдса.

Как видно из рис. 3 при коридорном размещении наблюдается высокая неравномерность распределения температур по поверхности изделий.



а – лобовая и правая часть; б – кормовая и левая часть

**Рис. 3.** Результаты теоретических исследований распределения температуры по поверхности цилиндрических изделий при групповом коридорном размещении

**Fig. 3.** Results of theoretical studies of the temperature distribution over the surface of cylindrical products in group corridor placement

Для предложенной схемы исследовали процесс нагревания поверхности при вариации диаметров заготовок. Наиболее оптимальный нагрев при максимально возможной загрузке камеры наблюдается при диаметре заготовок 50 мм (рис. 4).

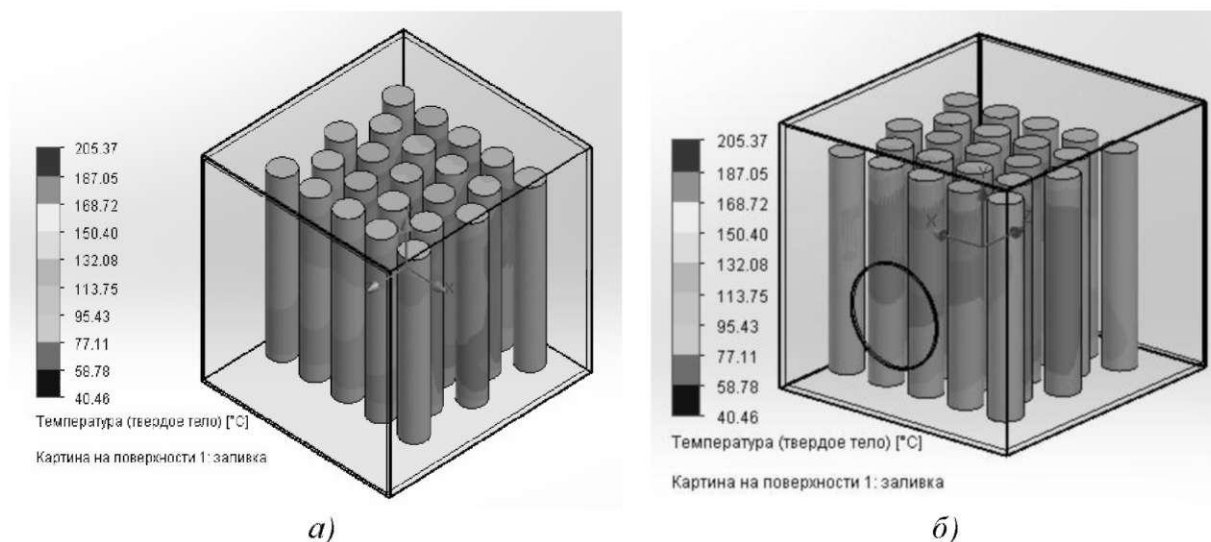
При диаметрах изделий  $d < 50$  мм или  $d > 50$  мм и при других схемах размещения температурный перепад увеличивался с появлением выраженных участков перегрева.

Разработанная компьютерная модель позволяет оценивать распределение температур по поверхности кулинарных изделий различных форм, размеров, состава, размещения и пр. На рис. 5 приведены примеры моделирования для плоских изделий конечной формы.

По данным рис. 5(а) видно, что при данной форме, размере и способе размещения наблюдается выраженный значительный температурный перепад по поверхности нагрева в изделиях разных рядов и ярусов, ярко выражен перегрев торцов в ряде изделий.

По данным рис. 5(б) видно, что при данных форме, размере и способе размещения температурный перепад невысокий, изделия в целом нагреваются равномерно.

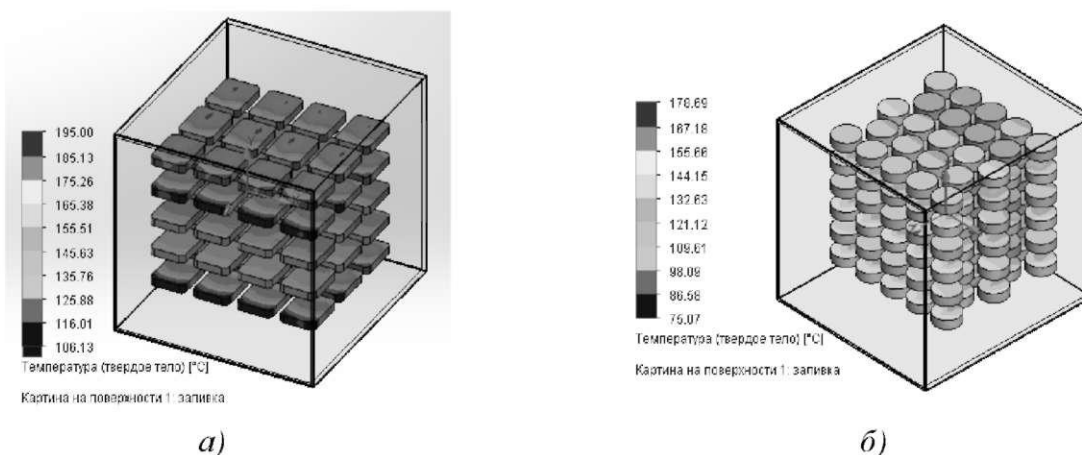
Таким образом, предлагаемая модель может использоваться в практической деятельности для оптимизации размещения нагреваемых изделий и подбора оптимальных параметров обработки.



а – лобовая и правая часть; б – кормовая и левая часть

**Рис. 4.** Нагревание поверхности при оптимальной схеме размещения и оптимальном диаметре изделий

**Fig. 4.** Heating of the surface with the optimal placement scheme and the optimal diameter of the products



**Рис. 5.** Нагревание поверхности изделий конечных форм

**Fig. 5.** Heating of the surface of products of final forms

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования в программном модуле SolidWorks Flow Simulation и проведенных экспериментальных исследований разработана параметрическая модель нагревания поверхности изделий из мясного фарша при запекании в условиях вынужденной циркуляции греющей среды, адекватно описывающая гидродинамические и теплофизические особенности протекания процесса.

Предлагаемая компьютерная модель обеспечивает эффективное описание картины распределения температур по поверхности нагреваемых изделий и позволяет определить усредненную величину температурного перепада.

Предложена оптимальная компоновка групповых цилиндрических изделий из мясного фарша и определен оптимальный диаметр заготовки, что обеспечивает наименьший температурный перепад при наибольшем коэффициенте загрузки рабочей камеры конвектома, стандартизированных под типоразмер GN 2/3 по системе Gastronorm.

Показано, что разработанная компьютерная модель может быть использована в практической деятельности для подбора режимных параметров тепловой обработки и оптимизации размещения изделий из мясного фарша различных форм и размеров.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Косой, В. Д. Совершенствование производства колбас: учебное пособие / В. Д. Косой, В. П. Дорохов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 766 с.
- 2 Смоляк, А. А. Сравнительная оценка процессов теплообмена при нагревании мясного фарша и модельных тел в воздушной среде / А. А. Смоляк, М. Н. Смагина, Д. А. Смагин // Вестник МГУП. – 2019. – № 1(26). – С. 120–129.
- 3 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. / F. Jihan. – Nebraska, 2010. – 231 p.
- 4 Рогов, И. А. Технология мяса и мясных продуктов / И. А. Рогов, А. Г. Забашта, Г. П. Казюлин. – М.: КолосС, 2009. – Книга 2. Технология мясных продуктов. – 712 с.
- 5 Elansari, A. Effect of temperature and moisture content on thermal conductivity of four types of meat. / A. Elansari, A. Hobani // International Journal of Food Properties. – 2002. – № 12(2). – P. 308–315.
- 6 Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
- 7 Дударева, Н. Ю. SolidWorks 2007 на примерах/Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
- 8 Амстистов, Е. В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Е. В. Амстистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев и др.: Под общей редакцией Е. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
- 9 Жукаускас, А. А. Конвективный перенос в теплообменниках / А. А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
- 10 Основин, В. Н. Справочник современных строительных материалов и конструкций / В. Н. Основин. – М.: Феникс, 2010. – 201 с.
- 11 Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – 2-с изд. – М.: «Пищевая промышленность», 1980. – 288 с.
- 12 Чубик, И. А. Справочник по теплофизическим константам пищевых продуктов и полуфабрикатов / И. А. Чубик, А. М. Маслов. – М.: «Пищевая промышленность», 1965. – 156 с.
- 13 Смагина, М.Н. Применение моделирующих материалов при исследовании тепловых процессов переработки мясного сырья / М. Н. Смагина, С. В. Акулченко, Д. А. Смагин, А. Л. Желудков // «Наукові праці Національного університету харчових технологій». – 2021. – Том 27. – № 1. – С. 80–89.
- 14 ГОСТ 28116-95 «Емкости функциональные для предприятий общественного питания. Основные и присоединительные размеры и технические требования».
- 15 EN 631-1:1993 «Материалы и изделия, контактирующие с пищевыми продуктами. Емкости для общественного питания. Размеры контейнеров».

*Поступила в редакцию 02.01.2021г.*

## ОБ АВТОРАХ:

**Марина Николаевна Смагина**, аспирант кафедры теплохладотехники, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: m.n.smagina@mail.ru.

**Аркадий Арсентьевич Смоляк**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплохладотехники, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий.

**Денис Алексеевич Смагин**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, e-mail: denis\_smagin@mail.ru

**Екатерина Руслановна Терешкова**, студент, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий.

## ABOUT AUTHORS:

**Marina N. Smahina**, post-graduate student of the Department of Heat and Refrigerating Engineering, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, e-mail: m.n.smagina@mail.ru.

**Arkady A. Smolyak**, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat and Refrigerating Engineering, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies.

**Denis A. Smahin**, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Machines and Apparatus of Food Production, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, e-mail: denis\_smagin@mail.ru.

**Ekaterina R. Tereshkova**, student, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies.