

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480>



Поступила 04.04.2024

Поступила после рецензирования 23.09.2024

Принята в печать 27.09.2024

© Макаров В. Н., Садыков А. Р., Четверикова Д. К., 2024

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Open access

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ МЯСА В ПЕЛЬМЕНЯХ НА ВРЕМЯ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ

Макаров В. Н.*, Садыков А. Р., Четверикова Д. К.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

частица мяса в тестовой оболочке, критериальный подход, этапы готовки, метод конечных элементов

На основании изученной литературы ставится цель: исследовать влияние объемной доли мяса в пельмене и количества пельменей на время их приготовления, а также провести анализ физико-математических и технических аспектов, которые необходимо учитывать (или не учитывать) в рамках намеченного исследования. Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи: провести экспериментальные исследования; описать допущения, которые необходимо принять при выполнении исследования; провести теоретические исследования (численные эксперименты, используя метод конечных элементов). Для проведения экспериментов в качестве объекта исследований были выбраны пельмени известных торговых марок, названия которых условно были обозначены как SK, SZ, RE, TS. Исследование пельменей известных торговых марок обусловлено как интересом потребителей, так и меньшей вариативностью параметров продукции, что повышает воспроизводимость результатов. В качестве допущений, принятых при натуральных экспериментах, авторы выделяют следующие: при варке участвует дистиллированная вода; объем пельменя не меняется в процессе варки; биохимическим составом начинки возможно пренебречь. В результате теоретического анализа приняты следующие допущения: при исследовании варки пельменя не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты; время всплытия пельменя пренебрежительно мало; «приближение о начальных значениях» — геометрические и физико-химические параметры пельменя не меняются в процессе готовки. Получено время приготовления 1, 5, 10 пельменей известных торговых марок на основе численных экспериментов. С помощью натуральных экспериментов исследовано время с момента погружения пельменей в воду до их всплытия. В результате численных экспериментов выяснено, что время нагрева центра пельменя известных торговых марок до температуры денатурации белков отличается от времени всплытия примерно на 360 секунд. Следовательно, после всплытия пельменям известных торговых марок необходимо еще около 6 минут варки до полной готовности.

Received 04.04.2024

Accepted in revised 23.09.2024

Accepted for publication 27.09.2024

© Makarov V. N., Sadykov A. R., Chetverikova D. C., 2024

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

THE INFLUENCE OF THE VOLUME FRACTION OF MEAT IN DUMPLINGS ON THEIR COOKING TIME

Valery N. Makarov*, Aleksandr R. Sadykov, Daria C. Chetverikova

Orenburg State University, Orenburg, Russia

KEY WORDS:

meat semi-finished product in dough, criterion approach, cooking steps, finite element method

ABSTRACT

Based on the studied literature, the aim was to investigate the influence of the volume fraction of meat in meat dumplings (pelmeni) and the number of dumplings on their cooking time, as well as to analyze the physico-mathematical and technical aspects to be taken into account (or not) within the framework of the planned experiment. To achieve this goal, the following tasks were set: to conduct experimental studies, to describe the assumptions that need to be accepted when performing the study and to conduct theoretical studies (numerical experiments, using the finite element method). When conducting experiments, dumplings of well-known brands, the names of which were conventionally labeled as "SK", "SZ", "RE", "TS", were chosen as objects of research. The need to study the dumplings of well-known brands is justified by both consumer interest and a smaller variability of product parameters, which increases the reproducibility of the results of the study. As assumptions adopted in real experiments, the authors emphasize the following ones: distilled water is used in cooking, the volume of a dumpling does not change during cooking, the biochemical composition of the filling can be neglected. As a result of the theoretical analysis, the following assumptions were made: the study of dumpling cooking does not take into account the resistance forces, i. e., turbulent and convective flows, as well as thermo-elastic effects; the time of dumpling floating to the surface is negligibly small; "approximation of initial values" — geometric, physico-chemical parameters of the dumpling do not change during cooking. Cooking time of 1, 5, 10 dumplings of known brands was obtained on the basis of numerical experiments. Using real experiments, the time from immersion of the dumplings in water to their floating to the surface was investigated. As a result of numerical experiments it has been found that the time of heating the center of the dumpling of known brands to the temperature of protein denaturation differs from the time of floating to the surface by about 360 seconds. Consequently, after floating to the surface, the dumplings of known brands need about six more minutes of cooking time until they are fully cooked.

1. Введение

За последние несколько лет пельмени стали объектом множества разносторонних исследований. Это объясняется экономической составляющей. Авторы [1] утверждают, что рынок пельменей является самым емким среди других замороженных полуфабрикатов, и эта тенденция сохраняется на протяжении уже многих лет. К аналогичным выводам пришла Курбангалиева А. А. [2] в результате

анализа экспорта российской готовой мясной продукции на рынок Казахстана.

Актуальность исследований пельменей обусловлена нетривиальным сочетанием ингредиентов и техник приготовления, а также необходимостью оптимизировать процесс варки для сохранения питательных свойств и вкуса. Это особенно важно в условиях постоянно растущих требований к качеству и безопасности пищевых продуктов [3–5].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макаров, В. Н., Садыков А. Р., Четверикова, Д. К. (2024). Влияние объемной доли мяса в пельменях на время их приготовления. *Пищевые системы*, 7(3), 473–480. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480>

FOR CITATION: Makarov, V. N., Sadykov, A. R., Chetverikova, D. C. (2024). The influence of the volume fraction of meat in dumplings on their cooking time. *Food Systems*, 7(3), 473–480. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480>

Кроме социально-экономических и инженерных исследований,пельмень рассматривали в рамках физико-математических наук — как теоретических, так и экспериментальных. Авторы статей [6,7] рассматривают процесс готовки пельменей с физико-математической точки зрения. Результатом разработки [6] является динамическая модель, учитывающая законы теплопередачи и использующая понятие степени готовности для пельменей M , введенное в исследовании [8]:

$$M = \int_0^t 10 \frac{T - T_{ref}}{Z_M} dt, \quad (1)$$

где Z_M — значения коэффициента качества, °C;
 t — это время нагрева, мин;
 T_{ref} — опорная температура, °C;
 T — температура внутри пельменей, °C.

Понятие степени готовности по своей специфике схоже с величинами, введенными в рамках критериального подхода статьи [9]. Авторы работы [6] сопоставляли критерий M , учитывающий температуру пельменя и время его нагрева, с оценкой вкусовых качеств, выбрав диапазон, соответствующий его приемлемым значениям. Данный подход имеет весомую долю субъективности, поэтому авторами настоящей работы он не применялся. В работе [7] методом анализа размерностей получено соотношение между временем готовки τ и параметрами мяса пельменя (радиусом частицы мяса R):

$$\tau = C_0 \frac{\rho c}{\kappa} R^2, \quad (2)$$

где τ — время приготовления пельменя;
 C_0 — константа порядка единицы;
 ρ — плотность мяса, кг/м³;
 c — теплоемкость мяса, кДж/(кг · °C);
 κ — коэффициент теплопроводности мяса, Вт/(м · °C).

В работе [7] указано, что время приготовления пельменей составляет несколько минут, однако авторы не приводят подробного описания методики, с помощью которой был получен данный результат. Также в статье [7] рассмотрены процессы варки пельменей в воде и на пару без учета оболочки. Ранее в литературе встречалось исследование теплопроводности шарообразных частиц мяса без оболочки [10], что применительно к данной задаче можно рассматривать как модель пельменя с бесконечно тонкой тестовой оболочкой. Материал [11] демонстрирует результаты изучения тестовой оболочки и ее трансформацию в процессе варки.

Экспериментальные исследования по приготовлению пельменей были приведены в работах [6,12]. Приготовленные пельмени были также проанализированы авторами [7] относительно степени готовности (2). Результатом [12] были исследования изменений внутренней температуры пельменей в процессе приготовления в зависимости от размера пельменей и от времени приготовления. Авторы пришли к выводу, что для приготовления пельменей при обжаривании их на сковороде или во фритюре достаточно около 3 минут, однако при готовке на пару требуется значительно большее время. Несмотря на емкие экспериментальные результаты, в работе [12] недостаточно теоретических исследований. Настоящее исследование направлено на изучение ключевых аспектов приготовления пельменей. Современные исследования продуктов и технологии пищевых производств все больше и больше привлекают фундаментальные методы математической физики и численного моделирования [13]. Это наиболее емко позволяет анализировать процессы приготовления и выделять ключевые факторы. Поэтому в настоящей работе процесс приготовления пельменей был рассмотрен не только в рамках экспериментальных исследований, но и относительно методов математической физики и численного моделирования. Ранее для анализа приготовления мяса использовался метод конечных элементов, например, описанный авторами [14,15], но работ, в которых варка пельменей была бы рассмотрена относительно численных методов, авторами найдено не было. Подход, предлагаемый авторами настоящей работы, предполагает наличие многих физико-математических приближений для упрощения решения, причем эти приближения необходимо обосновывать или даже строго доказывать. Основные расчетные данные и данные, которыми необходимо руководствоваться при проведении экспериментов, были получены из ГОСТ 33394-2015¹.

¹ ГОСТ 33394-2015 Пельмени замороженные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. — 21 с.

Наиболее важными аспектами приготовления пельменей можно считать:

- 1) Форму пельменей;
- 2) Количество пельменей;
- 3) Толщину теста, которая влияет на объемную долю мяса в пельмене V_M/V ;
- 4) Способ приготовления;
- 5) Время готовки.

Форму пельменя можно в первом приближении считать шарообразной. Количество пельменей важно учитывать, так как вопрос аппроксимации модели приготовления одного пельменя к множеству нетривиален и технологически важен. Способ приготовления также очень важен для учета физических процессов, протекающих в объекте исследования. На данный момент существует множество различных способов приготовления: классическая варка в воде, варка на пару [7,12], обжаривание на сковороде и во фритюре [12], варка в воде с использованием СВЧ-поля [16,17]. В работе [16] был проведен обширный кластерный анализ предпочтений потребителя относительно вкусовых качеств пельменей и их текстуры, приготовленных различными способами (обжаривание во фритюре, в микроволновой печи, на сковороде и на пару). Исследование показало слабую связь между субъективной оценкой текстуры и вкуса потребителями с объективными аналитическими показателями. Поэтому принято решение ограничить исследование анализом традиционного способа варки в воде. Следовательно, необходимо выяснить, как объемная доля мяса в пельменях V_M/V связана со временем приготовления.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния объемной доли мяса в пельмене и количества пельменей на время их приготовления, а также анализ физико-математических и технических аспектов, которые необходимо учитывать (или не учитывать).

2. Объекты и методы

Для достижения цели исследования необходимо проанализировать экспериментальные результаты, сформировав на их основе теоретическую базу, т. к. объектом исследования является сложная система с большим количеством параметров, частью из которых следует пренебречь на основе эмпирических данных.

2.1. Экспериментальные задачи

- 1) Выбрать пельмени известных торговых марок.
Необходимость исследования пельменей известных торговых марок обоснована как интересом потребителей, так и меньшей вариативностью характеристик объекта исследования, что делает результаты исследования легко воспроизводимыми.
- 2) Определить основные физико-математические, химические и биологические параметры пельменей до и после приготовления.
К основным физико-математическим, химическим и биологическим параметрам пельменей можно отнести: их геометрию (диаметр, толщина теста); данные об их составе; параметры жидкости, в которой будут вариться пельмени (температура, концентрация солей в водном растворе; объем жидкости).

В качестве объекта исследования случайно были выбраны пельмени четырех ценовых категорий с разным, но близким составом. Данные сведены в Таблицу 1 (указаны по убыванию цены). Авторами настоящей работы были выбраны пельмени именно этих торговых марок, так как они имеют близкий состав, перекрывают широкий диапазон цен и имеют разные геометрические характеристики. Названия торговых марок пельменей были условно переименованы для большей объективности исследований.

Таблица 1. Сводная таблица характеристик пельменей торговых марок, рассматриваемых в рамках настоящего исследования

Table 1. Summary table of characteristics of the dumplings of the brands examined within the framework of the present experiment

Условное название торговой марки	Цена за 100 г, руб.	Состав мяса
SK	78,57	говядина, свинина
SZ	50,00	говядина, свинина
RE	31,43	говядина, свинина
TS	22,50	телятина, говядина, курица

Среди рассмотренных торговых марок авторами не обнаружено пельменей, изготовленных из одного сорта мяса. Также неизвестна доля каждого сорта мяса в составе. Поэтому биохимическим составом начинки было решено пренебречь, т. е. учитывалась только объемная доля мяса к объему пельменя. Получены основные значения физических и геометрических характеристик пельменя до приготовления: толщина теста, диаметр пельменя и его масса. Если форма пельменя была ближе к сфероида или эллипсоиду, за диаметр принимали его наибольший размер. Для получения среднего результата проводились измерения 10 пельменей каждой торговой марки. Измеряли геометрические параметры электронным штангенциркулем 110–222U (CNCINS, Россия), не оказывая значительного давления на вещество, в воздушной среде с отрицательной температурой. Время измерения массы было сведено к минимуму, причем после этого пельмени были помещены в воздушную среду с отрицательной температурой. Масса измерялась с помощью лабораторных аналитических весов Pioneer PX224 (OHAUS Corporation, США). Для всех результатов измерений были характерны малые величины разброса результатов, среднеквадратичной ошибки и средней абсолютной погрешности. При анализе погрешностей измерений использовались стандартные методы учета приборных ошибок и ошибок, полученных в результате косвенных измерений. Аналогичные методы и объект исследования рассматривались, например, в работе [6]. Начальная температура объектов измерения в соответствии с ГОСТ 33394-2015 составляла -10°C . Температура измерялась с поверхности пельменей с помощью пирометра TemPro 900 (ADA Instruments, Китай). После покупки пельмени хранились в комбинированном лабораторном холодильнике ХЛ-250 (POZIS, Россия). Рассчитывалось отношение объемной доли мяса к объему пельменя до приготовления, которое равно:

$$\frac{V_M}{V} = 8 \left(\frac{1}{2} - \frac{d}{D} \right)^3, \quad (3)$$

где V_M — объем мяса в пельмене, мм^3 ;
 V — объем пельменя, мм^3 ;
 d — толщина теста, мм ;
 D — диаметр пельменя, мм .

Далее в металлической цилиндрической емкости на газовой горелке была нагрета до кипения дистиллированная вода при атмосферном давлении. Подробнее проанализируем необходимость использования дистиллированной воды в рассматриваемых исследованиях. Согласно второму закону Рауля, при добавлении соли (NaCl , марка ЧДА) в дистиллированную воду температура кипения раствора увеличивается [18], что должно отражаться на времени приготовления пельменей в нем. Однако эта связь прослеживалась лишь при добавлении соли от 10 г на 2 литра дистиллированной воды, в результате чего пельмени уже не соответствовали желаемым вкусовым качествам (определено органолептическим методом). Таким образом, авторы не считали целесообразным учитывать наличие соли, а рассматривали задачу, предполагая, что вода является дистиллированной. Для этого с использованием дистиллятора «Аквалаб Р5» («Аквалаб», Россия) была получена дистиллированная вода с удельной проводимостью менее $0,5 \text{ мкСм/см}$ и значением $\text{pH} = 6,55$. Показатель кислотности воды измерялся с помощью рН-метра настольного типа Hanna HI 2211-02 (Hanna Instruments, Германия).

Объем воды был намного больше объема продукта и составлял около 2 литров. Это условие позволяет минимизировать изменение температуры воды после погружения пельменей в нее и, следовательно, уменьшить время приготовления и точнее анализировать экспериментальные и теоретические данные.

Приготовление пельменей (τ) состоит из трех этапов:

- 1) Погружение в кипящую воду с последующим нагревом (t_1);
- 2) Процесс всплытия пельменей (t_2);
- 3) Варка пельменей до состояния готовности (t_3).

Запишем эти промежутки времени, как:

$$\tau = t_1 + t_2 + t_3, \quad (4)$$

где t_n — n -ый этап приготовления, причем $n = 1, 2, 3$.

Если продолжительность первых двух этапов можно легко измерить, то продолжительность третьего этапа зафиксировать затруднительно. Для этого в [12] были исследованы изменения внутренней температуры пельменей в процессе приготовления, причем температура измерялась термопарой. В настоящем исследовании контроль за температурой в процессе приготовления в натуральных экспериментах не велся из-за технологической сложности. Фик-

сировалось только время с момента погружения пельменя до его всплытия ($t_1 + t_2$). Для измерения этого времени использовался электронный секундомер «Интеграл С-01» (Электроника ПО «Интеграл», Беларусь). Таким образом, измерялось время 1, 5 и 10 пельменей 4-х торговых марок с момента их одновременного помещения в воду и до момента всплытия последнего пельменя. Во время измерения жидкость периодически аккуратно помешивали, чтобы минимизировать риск прилипания пельменей ко дну. Натурный эксперимент проводился при стандартных условиях в течение одних суток. Анализ третьего этапа приготовления t_3 производится путем сопоставления численных и натуральных экспериментальных результатов. Во время приготовления пельменей контролировалась температура воды с помощью пирометра TemPro 900 (ADA Instruments, Китай), которая составляла около 100°C .

Обсудим вопрос о количестве пельменей, которое необходимо рассматривать для проведения экспериментов. Очевидно, минимальное число для анализа приведенной задачи — 1 пельмень. Для усложнения увеличили это количество на один порядок, получая 10 пельменей. Средняя точка между этими двумя значениями — 5 пельменей. Такой простой подход позволяет качественно проследить степень влияния количества пельменей на время их приготовления. Более того, рассмотренное количество пельменей хорошо согласуется с рекомендацией их употребления человеком в размере одной порции [19].

Также, кроме измерения времени, получены значения диаметра и массы пельменя после всплытия. При измерении с поверхности пельменя удалялась жидкость. Расчеты массы и геометрических характеристик проводились аналогичными приборами, рассмотренными в настоящем исследовании. Толщина теста после всплытия не измерялась, так как ее границы были неопределенными из-за внешнего физико-химического воздействия. Для получения среднего результата проводилось 5 экспериментов для каждого количества пельменей каждой торговой марки. Данное число экспериментов является удовлетворительным для достоверной статистической обработки результатов. Подобное количество исследований приводится и в работе [6]. Для всех результатов измерений были характерны малые величины разброса результатов, среднеквадратичной ошибки и средней абсолютной погрешности. При анализе погрешностей измерений использовались стандартные методы учета приборных ошибок и ошибок, полученных в результате косвенных измерений [6].

После авторами настоящей работы были поставлены теоретические задачи.

2.2. Теоретические задачи

- 1) Обосновать допущения теоретической модели, опираясь на результаты экспериментов.
- 2) Описать теоретическую модель и привести необходимые константы для расчета.
- 3) Исследовать влияние доли мяса на время приготовления пельменей с помощью численных методов.
- 4) Сопоставить полученные результаты численных экспериментов; найти оптимальное время приготовления пельменей известных торговых марок и сделать соответствующие выводы.

Рассмотрим зависимость времени нагрева центра пельменей от объемной доли мяса в них. Для решения задачи использовалась модель теплообмена между водой (термостат, 100°C) и шарообразными частицами мяса в тестовой оболочке (начальная температура -10°C , согласно ГОСТ 33394-2015). Используя программное обеспечение Comsol Multiphysics 6.1, подключая модуль «Теплопроводность в твердых телах и жидкостях», приведем дифференциальное уравнение теплопроводности, справедливое для рассматриваемых задач [20]:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted}; \\ \mathbf{q} = -k \nabla T. \end{cases} \quad (5)$$

где: ρ — плотность, кг/м^3 ;

C_p — теплоемкость при постоянном давлении, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

T — температура, К ;

t — время, с ;

\mathbf{u} — характеристика поля скоростей, м/с ;

\mathbf{q} — плотность теплового потока, Вт/м^2 ;

Q — характеристика источника (или поглотителя) тепла, Вт/м^3 ;

Q_{ted} — величина, характеризующая термоупругие эффекты в телах, Вт/м^3 .

В данном случае одновременно решается система дифференциальных уравнений в частных производных, причем для каждого из материалов — воды, шарообразной частицы мяса и тестовой

оболочки. Для решения этой системы уравнений применялся метод конечных элементов. Подобные исследования проводились для анализа охлаждения свиной туши [21]. В настоящей работе для достижения поставленной цели решается задача о нахождении времени, которое затрачивается для нагрева центра шарообразной частицы мяса в тестовой оболочке до температуры денатурации белков 343,15 К (70 °С) [22]. Стоит отметить, что процесс денатурации очень сложен и многоступенчат из-за наличия в мясе большого количества белков, например, миозина, актина, тропомиозина, миоглобина. Однако, как было рассмотрено на начальной стадии исследования, биохимическим составом начинки возможно пренебречь. Поэтому авторами было принято решение использовать для численных экспериментов наиболее изученное мясо (с термодинамической точки зрения) — говядину [23,24], а примерной температурой денатурации белков выбрать 343,15 К (70 °С) [22]. Такое же значение температуры центра приготовленного пельменя используется в работах [6,8].

При решении задач методом конечных элементов необходимо проводить исследование на сходимости по сетке [25,26] и по шагу времени [27–29]. В программе Comsol Multiphysics 6.1 реализован алгоритм, который на основании геометрии модели и используемых модулей физики строит оптимальную сетку, поэтому было решено воспользоваться этим алгоритмом. Было проведено два набора численных экспериментов: один с переменным шагом по времени, задаваемым оптимизирующим алгоритмом Comsol Multiphysics 6.1, второй с фиксированным шагом 1 с. Для анализа результатов была выбрана вторая группа, так как дисперсия рассчитанных значений для нее оказалась меньше, чем у первой.

Модель также имеет несколько дополнительных допущений. Опишем их ниже.

Рассмотрим процесс всплытия пельменя со дна емкости. Высота столба жидкости h (глубина погружения пельменя в воду), температура на поверхности пельменя равна 100 °С, т. е. условно считаем, что поверхность пельменя с кипящей водой находится в термодинамическом равновесии.

Запишем второй закон Ньютона для всплывающего пельменя:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = m\vec{a}. \quad (6)$$

В рамках задачи будем считать, что сила сопротивления \vec{F}_C равна нулю (рассмотрим задачу без учета влияния на процесс конвективных турбулентных потоков, наличия пузырьков воздуха и соударения пельменей между собой и об стенки емкости, так как это существенно усложняет задачу), тогда

$$m\vec{g} + \vec{F}_A = m\vec{a}. \quad (7)$$

В проекции сил на ось OZ запишем уравнение (7) в дифференциальной форме:

$$F_A - mg = m \frac{d^2z}{dt^2}. \quad (8)$$

Силу Архимеда, действующую на пельмень, по определению найдем как:

$$F_A = \rho_w g V. \quad (9)$$

Тогда после преобразований получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2z}{dt^2} - \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1 \right) g = 0. \quad (10)$$

Решение дифференциального уравнения (10) имеет вид:

$$z = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1 \right) \frac{g t^2}{2} + C_1 t + C_2; \quad (11)$$

C_1, C_2 — вещественные числа.

В начальный момент времени ($t = 0$) пельмень находился в состоянии покоя на дне емкости. За начало координат принимается дно емкости, а время отсчитывается с момента всплытия пельменя. Тогда получим начальные условия:

$$\begin{cases} z(0) = 0; \\ \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Конечное условие — расстояние, которое преодолевает пельмень, равное высоте водяного столба; время всплытия пельменя:

$$z(t_2) = h. \quad (13)$$

Из начальных условий получим:

$$C_1 = C_2 = 0. \quad (14)$$

Из конечного условия получим:

$$h = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1 \right) \frac{g t_2^2}{2}. \quad (15)$$

Отсюда время всплытия t_2 определяется как:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1 \right)}}. \quad (16)$$

Причем плотность пельменя равна:

$$\rho_d = \frac{6m}{\pi D^3}. \quad (17)$$

Оценим среднее значение времени всплытия пельменя t_2 . Распределение средних плотностей пельменей, на основе полученных экспериментальных данных, приведено в Таблице 4 (или ГОСТ 33394-2015); плотность воды при температуре 100 °С равна $\rho_w = 958,4$ кг/м³ [30], в расчетах используем нормальное атмосферное давление; высота столба жидкости равна $h \approx 5,5$ см (из натуральных экспериментов). Тогда среднее время всплытия пельменя t_2 находится в диапазоне $0,09 \div 0,18$ с, что намного меньше времени до всплытия пельменей ($t_1 + t_2$) (Таблица 3). Таким образом, временем всплытия пельменя t_2 при анализе задачи можно пренебречь.

Рассмотрим величину Q_{ted} , характеризующую термоупругие эффекты в тестах из (5). Данные эффекты приводят к увеличению массы пельменя из-за физико-химических превращений. Определимся с основными факторами, влияющими на увеличение массы пельменя в процессе приготовления.

Так как тесто имеет пористую структуру [31], к нему применим закон Дарси [32,33] (запишем его для одной метрической координаты и времени):

$$\frac{dB}{dt} = -k(t) \cdot S(t) \cdot \frac{dp(t)}{dx}, \quad (18)$$

где $\frac{dB}{dt}$ — объемный расход воды, проходящей через тестовую оболочку,

м³/с;

$S(t)$ — площадь поверхности, м²;

$k(t)$ — коэффициент проницаемости теста, (м³·с)/кг;

$\frac{dp(t)}{dx}$ — градиент давления воды в тесте, Па/м.

Следует отметить, что процесс, описанный формулой (18), также зависит от температуры, и так как температура является функцией времени ($T = T(t)$), то в данной задаче эта зависимость явно не прописывается. Физико-химические превращения пельменя во время варки также подчиняются закону сохранения массы:

$$m(t) = m_0 + d\mu(t), \quad (19)$$

где m_0 — начальная масса;

$m(t)$ — масса после физико-химических превращений;

$d\mu(t)$ — изменение массы.

Так как $\rho(t) \frac{dB}{dt} = \frac{d\mu}{dt}$, используя формулу (18), запишем:

$$\frac{d\mu}{dt} = -k(t) \cdot S(t) \cdot \rho(t) \cdot \frac{dp(t)}{dx}. \quad (20)$$

Результаты натуральных экспериментов (Таблицы 3 и 4) позволяют заключить, что $m_0 \gg d\mu$, что справедливо и для объема пельменей. Таким образом, при проведении теоретического анализа можно пренебречь изменением массы и приравнять его к нулю:

$$d\mu = 0. \quad (21)$$

Отсюда следует, что скорость изменения массы также равна нулю:

$$\frac{d\mu}{dt} = 0. \quad (22)$$

Это, в свою очередь, позволяет заключить, что хотя бы один из сомножителей в формуле (20) равен нулю:

$$\begin{cases} k(t) = 0; \\ S(t) = 0; \\ \rho(t) = 0; \\ \frac{dp(t)}{dx} = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Исходя из физических условий данной задачи известно, что все сомножители в формуле (23), кроме $\frac{dp(t)}{dx}$, не обращаются в нуль на всем рассматриваемом интервале времени: коэффициент проницаемости теста не обращается в нуль, так как тесто имеет пористую структуру [31]; площадь поверхности не обращается в нуль, так как в рамках данной задачипельмень не является материальной точкой; плотность не обращается в нуль, так как масса и объемпельменя постоянны. Следовательно, градиент давления равен нулю, что свидетельствует об одинаковости давления внутри и снаружипельменя. Тогда термоупругими эффектами в телах можно пренебречь, так как:

$$Q_{ted} \propto d\mu = 0. \tag{24}$$

Очевидно, что данный подход достаточно груб и условен, однако в рамках поставленных задач он вполне применим. Приведенные рассуждения применительно кпельмням авторами настоящей работы в литературе замечены не были, поэтому описание данного вопроса является актуальным.

Процесс варкипельменя при численном моделировании представляет собой изменение его температуры в объеме, причем временем приготовления τ будет считаться время, за которое центрпельменя прогревается до 343,15 К (70 °С) [22]. В процессе исследования температурных полей при описании геометрических и физико-химических характеристикпельменя используем начальные значения, не меняя размерыпельменя, его массу и плотность, а также теплоемкость и теплопроводность теста [34]. Из теоретических приближений 1 и 2 — рассмотренное приближение вполне обосновано. Обозначим это приближение как «приближение о начальных значениях».

Перед решением поставленной задачи приведем все допущения, полученные в результате теоретического анализа:

- 1) При исследовании варкипельменя не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты;
- 2) Время всплытияпельменя t_2 пренебрежительно мало;
- 3) «Приближение о начальных значениях» — геометрические и физико-химические параметрыпельменя не меняются в процессе готовки.

Опишем рассматриваемую модель. Выбирались граничные и начальные условия, физико-математические и технические параметры задачи для численного моделирования:

- 1) T (вода) = 100 °С = 373,15 К (дополнительные характеристики взяты из [30]);
- 2) T (пельмени) = -10 °С = 263,15 К (ГОСТ 33394-2015).
- 3) Вода имеет форму цилиндра (пусть, $R = 11,25$ см, $h = 12$ см, т. е. объем цилиндра с водой намного больше объемапельменей);
- 4) Шарообразная частица мяса (говядина [23,24]) с начальными геометрическими размерами $r = 13$ мм; тестовая оболочка [34] ($d = 0,2$ см) — значения для численного моделирования выбирались близкими к Таблице 3.

Таблица 2. Исходные геометрические и физические параметрыпельменей, рассматриваемые в натурных экспериментальных исследованиях

Table 2. Initial geometrical and physical parameters of the dumplings examined in the real experiments

Торговая марка	Средняя толщина теста d , мм	Средний диаметр D , мм	Общая масса, г	Средняя объемная доля мяса к объемупельменя V_M/V , отн. ед.
SK	1,9	20,20	3,00	0,535
SZ	1,8	34,10	10,8	0,716
RE	1,6	28,60	8,40	0,701
TS	1,5	33,20	6,80	0,753

Таблица 3. Геометрические и физические параметрыпельменей после всплытия

Table 3. Geometrical and physical parameters of the dumplings after floating to the surface

Средние значения физических характеристик после всплытия	Торговые марки											
	SK			SZ			RE			TS		
	Количествопельменей			Количествопельменей			Количествопельменей			Количествопельменей		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Время t_1 , с	21,80	60,00	51,60	78,80	101,80	110,00	91,00	106,00	112,80	16,00	32,00	36,40
Диаметр D , мм	21,20			36,18			31,54			34,00		
Масса m , г	3,52			11,86			9,32			8,14		
Изменение массы $d\mu$, г	0,52			1,06			0,92			1,34		

- 5) Время нагрева центрапельменя до температуры денатурации белков примерно равно времени готовки τ .

3. Результаты и обсуждение

3.1. Экспериментальная часть

Средние значения параметровпельменей на начальном этапе исследований для каждой торговой марки рассчитаны по формуле (3) и сведены в Таблицу 2.

Полученные данные полностью соответствуют результатам ГОСТ 33394-2015. Значения средней объемной доля мяса кпельмню для трех торговых марок (SZ, RE, TS) отличаются незначительно и равны примерно 0,7 отн. ед., а упельменей торговой марки SK это значение самое малое из рассмотренных, причем средняя масса этихпельменей также самая малая.

Средние значения параметров 1, 5 и 10пельменей после всплытия для каждой торговой марки сведены в Таблицу 3.

Из Таблицы 3 видно, что при увеличении количествапельменей среднее время t_1 увеличивалось, особенно эта связь прослеживается при сопоставлении результатов для 1 и 5пельменей. Это связано, во-первых, с тем, что при увеличении количествапельменей температура изначально кипящей воды уменьшается все более значительно (несмотря на то, что объем воды много больше объемапельменей, полностью избавиться от этого эффекта невозможно), а, во-вторых, при увеличении количествапельменей необходимо передавать им суммарно большую энергию для приготовления. Стоит отметить, что дляпельменей торговой марки SK время t_1 для 5пельменей оказалось больше, чем для 10. Вероятно, это связано с наличием сложных конвективных турбулентных потоков, которые внесли в данные заметную погрешность.

В Таблице 4 приводятся данные об относительном изменении среднего диаметра до и после всплытия, а также средней плотностипельменя после всплытия. Средняя плотностьпельменей после всплытия определялась с помощью формулы (17), причем данные для расчета приведены в Таблице 3 (массы m и диаметры D).

Так как относительное изменение объемапельменя незначительно (не более 10%) — данное изменение возможно не учитывать. Более того, в работе [11] рассматривается методика уменьшения этой величины путем добавления в тесто порошка листьев лотоса.

3.2. Теоретическая часть

К рассмотренной модели применим все ранее описанные приближения, формулу (5) и разобьем систему на конечные элементы (Рисунок 1).

Далее определим время, которое необходимо, для нагрева 1, 5 и 10пельменей от начальной температуры (-10 °С = 263,15 К) до температуры (70 °С = 343,15 К). В качестве примера приведем изображение температурных полей для 5пельменей (Рисунки 2а, 2б). Заметим, чтопельмени в воде расположены случайно и расстояния между ними больше их собственного радиуса.

Таблица 4. Относительное изменение среднего диаметрапельменей до и после всплытия; средняя плотностьпельменя после всплытия

Table 4. Relative change in the average diameter of the dumplings before and after floating to the surface; average density of the dumpling after floating to the surface

Торговые марки	Относительное изменение среднего диаметра ΔD , %	Средняя плотность после всплытия ρ_d , кг/м ³
SK	4,95	705,56
SZ	6,10	478,28
RE	10,28	567,33
TS	2,41	395,54

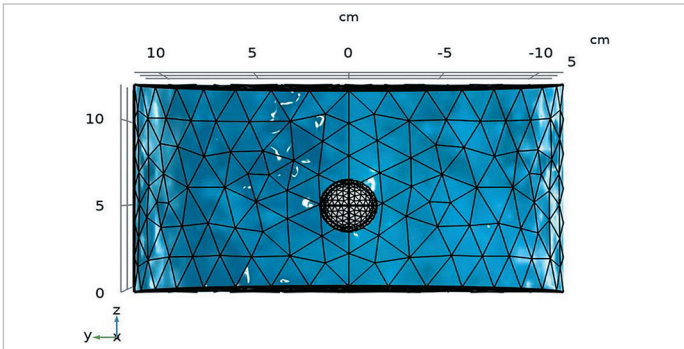


Рисунок 1. Разбиение системы (один пельмень в воде) на конечные элементы
Figure 1. Division of the system (one dumpling in water) on finite elements

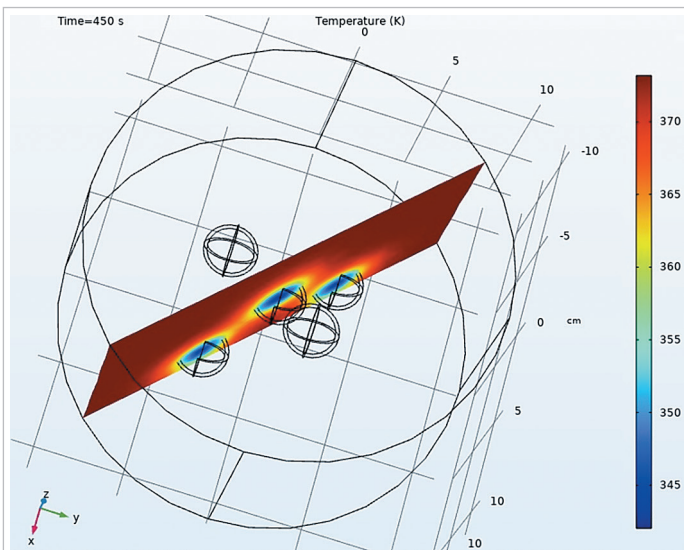


Рисунок 2a. Распределение шарообразных частиц мяса в тестовой оболочке по объему воды
Figure 2a. Distribution of spherical meat particles in the dumpling wrapper in the volume of water

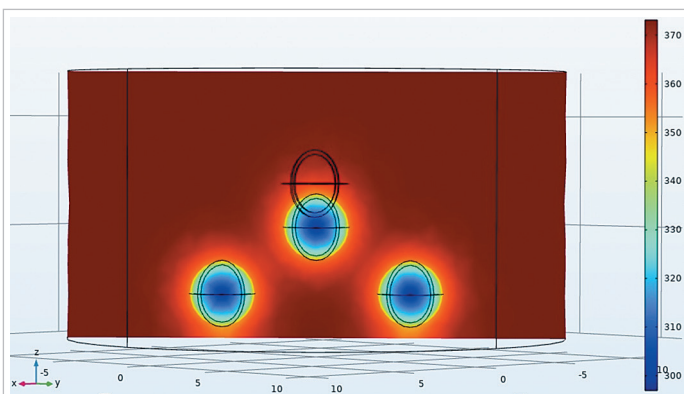


Рисунок 2b. Срез, визуализирующий температурное поле пельменей при варке
Figure 2b. Section visualizing the temperature field of the dumplings during cooking

После проводились численные эксперименты, в которых изменяли толщину теста для 1, 5 и 10 пельменей (от шарообразных частиц теста до шарообразных частиц мяса), причем общий объем продукта оставался постоянным.

3.3. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов

На Рисунках 3a, 3b, 3c представлены результаты экспериментов, включая время всплытия пельменей.

При анализе Рисунков 3 получены следующие выводы.

1) Среднее время нагрева центра пельменей до температуры денатурации белков отличается от времени всплытия t_1 примерно

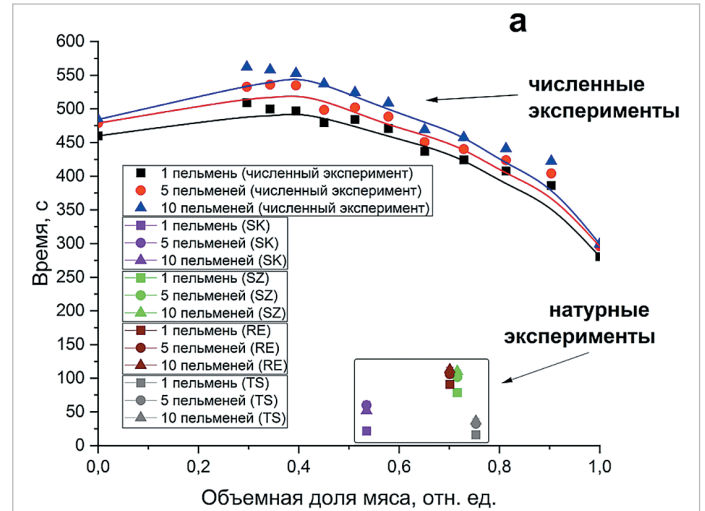


Рисунок 3a. Сопоставление натуральных (экспериментальное время всплытия t_1) и численных (расчетное время нагрева центра пельменя до температуры денатурации белков τ) экспериментов

Figure 3a. Comparison of real (experimental time of floating to the surface t_1) and numerical (calculated time of heating the dumpling center to the temperature of protein denaturation τ) experiments

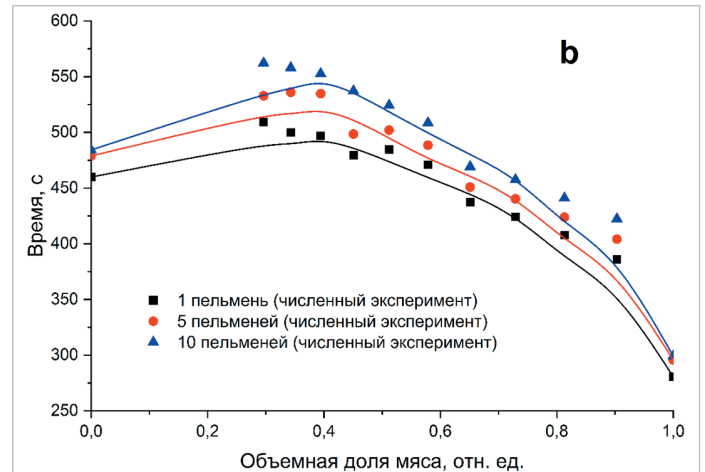


Рисунок 3b. График зависимости объемной доли мяса в пельмене от времени нагрева центра пельменя до температуры денатурации белков τ , полученный с помощью численных экспериментов; для сглаживания графиков использовался метод скользящей средней

Figure 3b. Graph of the dependence of the volume fraction of meat in the dumpling on the time of heating the dumpling center to the temperature of protein denaturation τ obtained by numerical experiments; the moving average method was used for graph smoothing

на 360 секунд (Рисунок 3a). Следовательно, после всплытия пельменям необходимо еще около $t_3 \approx 6$ минут варки до полной готовности.

2) С увеличением толщины теста время приготовления возрастает нелинейно (Рисунок 3b). Этот результат согласуется с результатами из [35].

3) Время приготовления 1, 5 и 10 пельменей при равной объемной доле мяса в пельменях отличается незначительно (Рисунок 3b), однако, как и для случая с натурными экспериментами (Таблица 3), можно заключить, что при увеличении количества пельменей время их приготовления растет. Стоит отметить, что в натуральных экспериментах эта связь прослеживается более явно, так как при увеличении количества пельменей температура изначально кипящей воды уменьшается все более значительно, а также конвективные и турбулентные потоки увеличивают теплообмен. При численном моделировании следует принимать во внимание ошибки, вызванные самим методом расчета.

4) Значения средней объемной доли мяса к пельменю для трех торговых марок (SZ, RE, TS) отличаются незначительно, однако значения их масс находятся в широком диапазоне (Таблица 2),

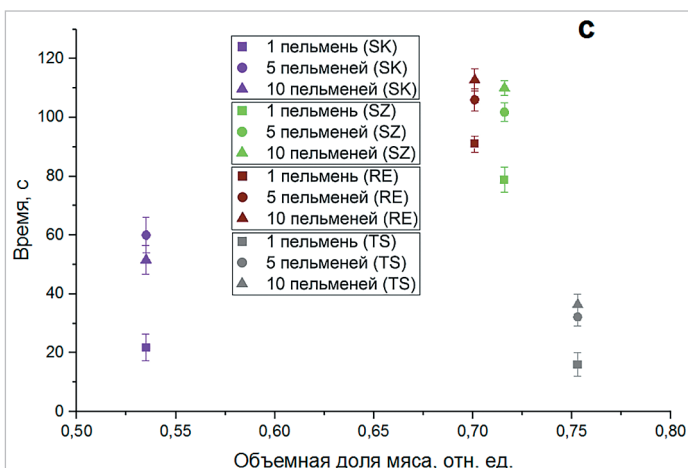


Рисунок 3с. График зависимости средней объемной доли мяса в пельмене от времени помещения пельменей в емкость до его всплытия t_1 , полученный с помощью натуральных экспериментов

Figure 3c. Graph of the dependence of the average volume fraction of meat in a dumpling on the time of its placing into a container until its floating to the surface t_1 obtained by real experiments

поэтому именно эта величина будет существенно влиять на время приготовления. Пельмени марок RE и SZ обладают наибольшей средней массой, что обуславливает самое продолжительное время всплытия t_1 среди рассмотренных образцов (Рисунок 3с). Пельмени торговой марки TS имеют самое высокое значение средней объемной доли мяса к пельменю, а пельмени марки SK — самое низкое. Поэтому время всплытия t_1 пельменей торговой марки SK в среднем больше, чем для пельменей торговой марки TS (Рисунок 3с). Этот результат натуральных экспериментов хорошо согласуется с численными экспериментами (Рисунок 3б), однако он менее явный из-за разницы масс пельменей.

В Таблице 5 приведено время приготовления пельменей известных торговых марок на основе численных экспериментов, используя их параметры из Таблицы 2.

Полученные результаты по времени приготовления находятся в очень широком диапазоне времени (от 217,22 секунд для 1 пельменя

Таблица 5. Результаты расчета времени приготовления и времени всплытия до готовности 1, 5, 10 пельменей известных торговых марок

Table 5. Results of the calculation of the time of preparation and time of floating to the surface until readiness of 1, 5, 10 dumplings of well-known brands

Физическая характеристика	Торговые марки											
	SK			SZ			RE			TS		
	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	Количество пельменей	
	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Время приготовления τ , с	217,22	218,50	218,49	546,13	591,42	663,37	389,53	400,78	412,64	507,18	546,85	593,82
Время от всплытия до готовности t_3 , с	195,42	158,50	166,89	467,33	489,62	553,37	298,53	294,78	299,84	491,18	514,85	557,42
Средняя объемная доля мяса в пельменях V_M/V , отн. ед.	0,535			0,716			0,701			0,753		

марки SK до 663,37 секунд для 10 пельменей марки SZ) и согласуются с данными по времени приготовления пельменей из [17,35,36]. Для всех рассматриваемых пельменей наблюдается увеличение времени приготовления от количества пельменей, но незначительное. После всплытия необходимость учета массы пельменей становится более явной. Это заметно на примере разницы времени приготовления пельменей марок SK и SZ. При сопоставимых массах время приготовления пельменей марки TS в среднем больше, чем пельменей марки RE.

При этом среднее время от всплытия до готовности 1, 5, и 10 пельменей t_3 составляет около 6 минут (если рассмотреть пельмени всех марок из Таблицы 5). Следовательно, именно это время и стоит рекомендовать в качестве среднего времени готовки пельменей после их всплытия. Приведенные результаты будут полезны для пищевой промышленности.

4. Выводы

Пельмени рассматриваемых торговых марок полностью соответствуют ГОСТ 33394-2015. Анализ эмпирических и теоретических данных исследования варки пельменей выявил ряд физико-математических и технических аспектов, которыми можно пренебречь.

- 1) Не учитывается биохимический состав мясной начинки пельменя.
- 2) Не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты.
- 3) Время всплытия пельменя со дна емкости пренебрежительно мало в сравнении с другими исследуемыми временами готовки.
- 4) В процессе исследования температурных полей не учитывается изменение начальных параметров пельменя: размеры, масса и плотность; теплоемкость и теплопроводность теста.
- 5) Процесс приготовления идет в дистиллированной воде при нормальном давлении.

В результате анализа натуральных и численных экспериментов получены следующие результаты:

- 1) Время приготовления пельменей превышает время всплытия примерно на 6 минут, то есть после всплытия пельменей требуется около 6 минут для их полной готовности.
- 2) При увеличении толщины теста время приготовления увеличивается, причем зависимость нелинейная.
- 3) При увеличении количества пельменей время их приготовления возрастает.
- 4) При анализе времени приготовления пельменей стоит также учитывать их массу, так как при повышении средней массы пельменей время их приготовления увеличивается. После всплытия необходимо учитывать массу пельменей становится более явной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Глинкина, И. М., Рыжков, Е. И. (2020). Анализ современного состояния российского рынка мясных полуфабрикатов в тесте. *Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции*, 1, 28–32. [Glinkina, I. M., Ryzhkov, E. I. (2020). Analysis of the current state of the Russian market of semi-finished meat products in dough. *Technologies and Commodity Science of Agricultural Products*, 1, 28–32. (In Russian)]
2. Курбангалиева, А. А. (2021). Экспорт российской готовой мясной продукции на рынок Казахстана: возможности и вызовы. *Теория и практика мировой науки*, 4, 26–27. [Kurbangalieva, A. A. (2021). Export of Russian finished meat products to the Kazakhstan market: Opportunities and challenges. *Theory and Practice of World Science*, 4, 26–27. (In Russian)]
3. Embling, R., Neilson, L., Mellor, C., Durodola, M., Rouse, N., Haselgrove, A. et al. (2024). Exploring consumer beliefs about novel fortified foods: A focus group study with UK-based older and younger adult consumers. *Appetite*, 193, Article 107139. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.107139>
4. O'shea, P. (2015). Dodgy dumplings and lethal liver: Risk, food terrorism, and Sino-Japanese relations. *The Pacific Review*, 28(2), 303–321. <https://doi.org/10.1080/09512748.2014.995128>
5. Li, Z., Wang, L., Chen, Z., Yu, Q., Feng, W. (2018). Impact of protein content on processing and texture properties of waxy rice flour and glutinous dumpling. *Journal of Cereal Science*, 81, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.03.005>
6. Zhu, Q., Liang, Y., Shao, Z. (2015). Dumpling cooking-modeling and simulation. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.007>
7. Varlamov, A., Zhou, Z., Chen, Y. (2018). Boiling, steaming or rinsing? (physics of the Chinese cuisine). *arXiv preprint arXiv:1806.09912*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.09912>
8. Deng, L. (2013). Kinetic functions, optimizing model and definition of «Huoho» for Chinese cooking. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(4), 278–284. (In Chinese)
9. Chavez-Gonzalez, M. L., Balagurusamy, N., Aguilar, C. (2019). Advances in food bioproducts and bioprocessing technologies. CRC Press, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429331817>
10. Sheen, S., Huang, L., Hwang, C.-A. (2024). Numerical simulation of heat transfer during meat ball cooking and microbial food safety enhancement. *Journal of Food Science*, 89(5), 1632–1641. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16949>

11. Park, J. H., Kim, E. M. (2013). Quality characteristics of dumpling shell added with white lotus leaf powder. *Culinary Science and Hospitality Research*, 19(2), 1–10. <https://doi.org/10.20878/cshr.2013.19.2.001> (In Korean)
12. Kim, J.-G., Kim, J.-S. (2013). Changes of internal temperature during the cooking process of dumpling (Mandu). *Korean Journal of Human Ecology*, 22(3), 485–492. <https://doi.org/10.5934/kjhe.2013.22.3.485> (In Korean)
13. Фоменко, Е. В., Нугманов, А. Х. Х. (2019). Управление скоростью перемещения вязкоупругих материалов в цилиндрическом канале шнекового питателя формирующих устройств. *Техника и технология пищевых производств*, 49(1), 113–119. [Fomenko, E. V., Nugmanov, A. Kh. Kh. (2019). Velocity control of visco-elastic materials movement in the cylindrical channel of the grinder feed screw of the former. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(1), 113–119. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-113-119>
14. Olivera, D. F., Salvadori, V. O. (2008). Finite element modeling of food cooking. *Latin American Applied Research*, 38(4), 377–383.
15. Purlis, E., Salvadori, V.O. (August 14–18, 2005). *Meat cooking simulation by finite elements*. 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, 2005.
16. Park, S., An, J., Lee, J. (2023). Consumer acceptability and texture analysis of frozen dumplings using different cooking methods. *Food Science and Biotechnology*, 33(4), 877–887. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01389-9>
17. Tang, J. (2015). Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality. *Journal of Food Science*, 80(8), E1776–E1793. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12959>
18. Mortimer R. G. (2008). *Physical Chemistry*. Academic Press, 2008.
19. Горбачев, В. В., Никитин, И. А., Велина, Д. А., Муталлибзода, Ш., Балашова, М. С. (2022). Оценка потребительских предпочтений россиян: «Ловушка среднего рациона». *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 6(390), 90–98. [Gorbachev, V. V., Nikitin, I. A., Velina, D. A., Mutallibzoda, S.H., Balashova, M. S. (2022). Assessment of consumer preferences of Russians: "Average ration trap". *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 6(390), 90–98. (In Russian)]
20. Tikhonov, A. N., Samarskii, A. A. (2013). *Equations of mathematical physics*. Edwin Mellen Press, 2013.
21. Ren, Q., Zhu, X., Li, J., Han, J., Fang, K. (2023). Heat and mass transfer model for pork carcass precooling: Comprehensive evaluation and optimization. *Food and Bioprocess Processing*, 138, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.01.004>
22. Беляева, М. А. (2004). Математические описания денатурации миозина, актина, тропомиозина, миоглобина мяса в процессе тепловой обработки. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6, 63–65. [Belyaeva, M. A. (2004). Mathematical descriptions of denaturation of meat myosin, actin, tropomyosin, myoglobin in the process of heat treatment. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6, 63–65. (In Russian)]
23. Spiess, W., Walz, E., Nesvadba, P., Morley, M., Haneghem, Salmon, D.R. (2001). Thermal conductivity of food materials at elevated temperatures. *High Temperatures — High Pressures*, 33, 693–697.
24. Engchuan, W., Jittanit, W. (2013). Electrical and thermo-physical properties of meat ball. *International Journal of Food Properties*, 16(8), 1676–1692. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604891>
25. Карлухин, В. А., Вишнева, Н. В. (2014). Верификация модели взаимодействия ультразвуковой колебательной системы с тканями пародонта. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 1, 70–82. [Karpushin, V. A., Vishneva, N. V. (2014). Verification of an interaction model of an ultrasonic oscillatory system with periodontal tissues. *Mechanical Engineering and Computer Technologies*, 1, 70–82. (In Russian)]
26. Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., Bowman, K. (2005). Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management*, 46(6), 847–867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.010>
27. Sun, W., Ma, H., Qu, W. (2024). A hybrid numerical method for non-linear transient heat conduction problems with temperature – dependent thermal conductivity. *Applied Mathematics Letters*, 148, Article 108868. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2023.108868>
28. Reddy, S. R., Dulikravich, G. S. (2019). Simultaneous determination of spatially varying thermal conductivity and specific heat using boundary temperature measurements. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 27(11), 1635–1649. <https://doi.org/10.1080/17415977.2019.1578352>
29. Beckers, K. F., Koch, D. L., Tester, J. W. (2015). Slender-body theory for transient heat conduction: Theoretical basis, numerical implementation and case studies. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471(2184), Article 20150494. <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0494>
30. Harvey, A. H., Hrubý, J., Meier, K. (2023). Improved and always improving: Reference formulations for thermophysical properties of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 52(1), Article 011501. <https://doi.org/10.1063/5.0125524>
31. Li, X., Lv, Y., Chen, Y., Chen, J. (2016). A study on the relationship between rheological properties of wheat flour, gluten structure, and dumpling wrapper quality. *International Journal of Food Properties*, 19(7), 1566–1582. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.951894>
32. Yasin, M., Hina, S., Naz, R. (2023). A modern study on peristaltically induced flow of Maxwell fluid considering modified Darcy's law and Hall effect with slip condition. *Alexandria Engineering Journal*, 76, 835–850. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.074>
33. Zhang, L., Doursat, C., Vanin, F. M., Flick, D., Lucas, T. (2017). Water loss and crust formation during bread baking, Part I: Interpretation aided by mathematical models with highlights on the role of local porosity. *Drying Technology*, 35(12), 1506–1517. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1260029>
34. Patil, P. N., Sawant, D. V., Deshmukh, R. N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water — A review. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 1194–1207.
35. Альшевский, Д. Л., Смирнова, Д. О. (2021). Разработка рецептуры мясных полуфабрикатов с использованием растительного, безглютенового сырья. *Наука и Образование*, 4(2). Статья 300. [Alshevsky, D. L., Smirnova, D. O. (2021). Development of a recipe for semi-finished meat products using vegetable, gluten-free raw materials. *Science and Education*, 4(2), Article 300. (In Russian)]
36. Пангачева, Ю. С., Есепенок, К. В. (2024). Оценка качества пельменей из мяса индейки, реализуемые в розничных сетях города Москвы. *Товаровед продовольственных товаров*, 4, 215–219. [Pangacheva, Yu.S., Eserpenok, K. V. (2024). Assessing the quality of turkey meat pelmeni sold in Moscow retail chains. *Food Products Commodity Expert*, 4, 215–219. (In Russian)] <https://doi.org/10.33920/igt-01-2404-04>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Макаров Валерий Николаевич — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики и методики преподавания физики физического факультета, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7-919-868-23-56 E-mail: makarsvet13@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5749-1427 * автор для контактов</p> <p>Садьков Александр Равильевич — ассистент, кафедра физики и методики преподавания физики физического факультета, аспирант, кафедра прикладной математики института математики и информационных технологий, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7-901-087-10-57 E-mail: aleksandr.sadykov.2012@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-4087-8104</p> <p>Четверикова Дарья Константиновна — студент, кафедра химии микро-биологического факультета, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7-906-844-31-32 E-mail: chetverikova_dar@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0002-9074-3205</p>	<p>Valery N. Makarov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Faculty of Physics, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7-919-868-23-56 E-mail: makarsvet13@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5749-1427 * corresponding author</p> <p>Aleksandr R. Sadykov, Assistant, Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Postgraduate student, Department of Applied Mathematics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7-901-087-10-57 E-mail: aleksandr.sadykov.2012@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-4087-8104</p> <p>Daria C. Chetverikova, Student, Department of Chemistry, Faculty of Chemistry and Biology, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7-906-844-31-32 E-mail: chetverikova_dar@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0002-9074-3205</p>
Критерии авторства	Contribution
<p>В. Н. Макаров руководил проектом, проводил анализ теоретических и экспериментальных данных, формировал рукопись статьи. А. Р. Садьков формировал литературный обзор, производил численное моделирование и численные эксперименты. Д. К. Четверикова получала экспериментальные данные.</p>	<p>V. N. Makarov led the project, analyzed theoretical and experimental data, and formed the manuscript of the article. A. R. Sadykov formed the literature review, performed numerical modeling and numerical experiments. D. C. Chetverikova obtained experimental data.</p>
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.