

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики
Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

На правах рукописи

АФЕНЧЕНКО ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2022

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент **Севаторов Николай Николаевич**. ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского».

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры Технической теплофизики **Захаров Николай Иванович** ГОУ ВПО "Донецкий национальный технический университет"

кандидат технических наук, доцент кафедры Пищевые технологии и оборудование **Прокопенко Ирина Александровна** ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры", факультет инженерных и экологических систем в строительстве

Защита состоится «10» ноября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.025.02 при ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» по адресу: 283055, г. Донецк, пр. Театральный, 28, корпус 3, ауд. 3231, тел:+38(062)304-50-50, e-mail:dissovet102502@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» по адресу: 283017, г. Донецк, б. Шевченко, 30 (<http://library.donnuet.ru>). Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.025.02 к.т.н., доцент



Н.Н. Севаторов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Обработка высоким гидростатическим давлением (ОВГД) приобрела исключительную важность во многих областях пищевой промышленности. В последние годы она становится альтернативой процессу традиционной термообработки, так как может обеспечить исключение образования неприятного вкуса, ухудшения компонентов и питательных веществ в продуктах питания, создает уникальную текстуру продукта и потенциально является тем процессом, который позволяет значительно экономить энергетические и материальные ресурсы. Диапазон варьирования применяемого высокого гидростатического давления (ВГД) для обработки различных продуктов и исходного сырья от 100 МПа до 1000 МПа зависит от поставленных целей и получаемого конечного продукта. Также важное значение имеют время экспозиции ВГД и температура процесса.

Давление совместно с температурой и химическим потенциалом представляют собой термодинамическую характеристику состояния системы. ВГД при взаимодействии с температурой – может оказывать влияние на различные физические и химические эффекты, механизмы и структуры, и таким образом создавать феномены абсолютно нового типа. Кинетика биохимических реакций зависит соответственно от тепловой, химической и механической чувствительности системы.

Согласно принципу Паскаля, ВД имеет равномерное и мгновенное действие на всю массу продукта. Физико-химические изменения во время ОВГД происходят по принципу Ле Шателье, который утверждает, что любая реакция, конформационное изменение или фазовый переход, который сопровождается уменьшением объема, будут ускоряться при высоком давлении (ВД), тогда как реакции, которые сопровождаются увеличением объема, будут замедляться.

Из этого предположения вытекает встречающийся в литературе ошибочный вывод, что воздействие ВД по сравнению с термическими процессами имеет преимущество в том, что может воздействовать ускоренно и однородно на всё обрабатываемое вещество независимо от формы, размера и состава. Тем не менее, без внимания оставлена возможность физической и термической неоднородности.

Вопросами развития теоретических основ процесса обработки ВГД пищевых продуктов занимались зарубежные и отечественные ученые: П. Бриджмен, Д. Гувер, Д. Кнорр, Д. Хендрикс, В. Хайнц, Д.П. Смелт, М. Гоникберг, Д. Кашнер, А.Е. Крисс, А. Дельгадо, С. Хартман, К. Раух, В. Ковальчук, А.В. Горбатов, Д.С. Циклис, С.Н. Туменов, В.Д. Косой, Х. Дрикамер, Е.В. Золотых, С.С. Ахметов, М.Н. Жаксалыкова, В.А. Сукманов, С.А. Соколов, С.Л. Тихонов, В.М. Шаталов, В.Б. Гаркуша, Ю.Н. Петрова, В.Л. Дебелый, Н.Н. Севаторов, А.А. Декань, И.А. Зотова и др.

Многими из этих исследователей отмечался факт температурной неоднородности в камерах ВД различных объемов и конструктивных исполнений (поршневого типа или с инъекционным подводом рабочей среды).

Наличие такой неоднородности может приводить к искажению ожидаемых результатов ОВГД.

Также в трудах Д. Кнорра, С. Хартмана, А. Дельгадо, М. Пеля, Л. Отеро, С. Денниса и др. рассматривались вопросы численного моделирования гидродинамических и тепловых изменений во время ОВГД, были изучены динамические изменения, происходящие в рабочей среде и исследована теплопередача во время ОВГД.

Существующие на данный момент сведения о моделировании и числовой имитации термогидродинамических процессов не учитывают неоднородности распределения температур в результате процесса воздействия ВД. Индуцированные созданием давления поля течения и поля температур оказывают значительное влияние на распределение температуры в начале экспозиции. Однако, исследования в этой области сопряжены со значительными трудностями, которые вызваны недостатком технологий для измерения и визуализации температуры, давления и скорости потоков в камере ВД во время применения ВГД.

Наличие тепловой неоднородности в продукте и следующая в результате этого неоднородность процесса делают необходимым прогнозирование тепловой неоднородности, в том числе и для принятия мер противодействия. Особенно для этого подходят математическое и цифровое моделирование, что, таким образом, делает их выполнение обязательным на этапе проектирования оборудования для обработки высоким давлением.

Численное моделирование играет жизненно важную роль, как альтернативная исследовательская методология не только в случаях, когда реальные эксперименты невозможны или очень трудновыполнимы. Оно использовалось в некоторых исследовательских работах, благодаря своей эффективности и точности. Кроме того, во многих случаях дешевле выполнить численное моделирование, чем выполнять реальные эксперименты. В целом, численное моделирование пользуется все большим вниманием со стороны исследователей во многих областях исследовательской работы, включая обработку высоким давлением.

Таким образом, тема диссертационного исследования, посвященная разработке математической модели камеры ВД и моделированию процессов температурной и гидравлической неоднородности в камерах заданных геометрических размеров при различных граничных условиях технологического процесса ОВГД, является своевременной и актуальной.

Связь работы с научными программами, планами. Работа содержит результаты исследований, выполненных автором в плане госбюджетной тематики НИР ГО ВПО «ДонНУЭТ» Д-2010-18 "Инновационные методы обработки продуктов питания и разработка технологического оборудования", Д-2014-9 «Теоретическое обоснование инновационных методов обработки продуктов питания, сырья и создание технологического оборудования», Д-2018-21 «Разработка инновационной стратегии и моделей массообменных процессов повышенной эффективности для получения экстрактов из растительного сырья», а также хоздоговорной тематики (Тема Г419/2008 -

Рекомендации по компьютерному моделированию в процессе обработки продуктов питания высоким давлением).

Цель работы - разработка математической модели камеры высокого давления для исследования неоднородных температурных полей (неоднородностей) в ограждающих конструкциях и передающей давление среде (воде) при различных температурных режимах подвода среды высокого давления.

Задачи исследования:

- создать числовую модель распределения полей температур внутри камер заданных геометрических размеров для обработки продуктов питания высоким давлением при различных граничных условиях;
- исследовать температурную неоднородность, возникающую в нагнетательной среде (воде);
- выполнить верификацию результатов математического моделирования с имеющимися экспериментальными данными;
- определить влияние геометрических размеров камеры на распределение полей температур в нагнетательной среде;
- определить влияние теплоизоляционной вставки на распределение полей температур в нагнетательной среде.

Объект исследования - процессы тепло-массопереноса в камерах высокого давления с инжекционным подводом среды высокого давления.

Предмет исследования - математические модели процесса тепло-массопереноса в камерах высокого давления с инжекционным подводом нагнетательной среды с различными граничными условиями.

Методы исследования. Теоретические исследования в работе базировались на данных теории ОВГД пищевых продуктов зарубежных и отечественных ученых. В ходе выполнения работы применялись компьютерные технологии: для математического моделирования распределения полей температур и полей скоростей программный продукт ANSYS Fluent 19.5, для статистического моделирования – табличный процессор Microsoft Excel, для создания графического материала – профессионально направленная программа КОМПАС - 3D.

Обоснование и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность теоретических исследований, полученных аналитических зависимостей обеспечена использованием современных лабораторных методов исследования. Обработка и анализ результатов экспериментов подтверждены результатами компьютерного моделирования в современных программных аналитико-статистических средах и приложениях для инженерных вычислений.

Научная новизна полученных результатов заключается в создании числовой модели распределения полей температур внутри камер заданных геометрических размеров для обработки продуктов питания высоким давлением при различных граничных условиях и оценке влияния масштабирования камер на температурную гетерогенность.

Практическая ценность работы заключается в получении параметрических моделей камер высокого давления с различными граничными условиями, используемых при проектировании камер высокого давления с

инжекционным подводом рабочей среды с учетом температурной неоднородности.

Положения, выносимые на защиту: аналитическое описание феномена температурной гетерогенности, которая возникает в камере высокого давления при сопряженной теплопередаче. Уменьшение температурной неоднородности в нагнетательной среде вследствие установки термоизолирующей вставки либо изменения размера камеры.

Реализация результатов работы. Внедрение научно-технических и технологических разработок осуществлено в производственных условиях на предприятии Донецкой Народной Республики: ООО «Фирма «ВИ-ВА» (г. Донецк, справка от 29.10.2021).

Результаты научных исследований защищены тремя патентами на полезную модель.

Научные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, рекомендованы для использования в научно-исследовательских и проектно-конструкторских учреждениях пищевого машиностроения, а также в учреждениях высшего профессионального образования, которые занимаются подготовкой специалистов в области разработки и эксплуатации оборудования пищевых производств.

Личный вклад соискателя состоит в разработке основной концепции диссертационной работы, критическом анализе материалов, касающихся теории процесса ОВГД и математического моделирования данного процесса, разработке математических моделей процесса ОВГД с различными граничными условиями, корреляции результатов численного моделирования с данными, представленными в литературных источниках.

Апробация результатов работы. Положения и выводы диссертации апробированы в ходе научно-практической деятельности автора. Основные результаты по теме диссертационной работы докладывались на: ежегодных научных конференциях Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского в 2016-2021 годах; I-V Международных научно-технических конференциях «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» в 2016-2021 годах; II-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования» (г. Керчь, 2019 г.); Пулах научно-практических конференций (г. Сочи, 2020, 2021 г.г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 научных работ, в том числе: 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, утвержденных ВАК МОН ДНР, 2 статьи в утвержденных журналах РИНЦ, 1 – в издании Scopus, 6 тезисов докладов и материалов конференций, 2 монографии и 3 патента на полезную модель.

Структура диссертации. Основное содержание работы изложено на 161 страницах машинописного текста, который состоит из 4 разделов и 4 приложений. Диссертация проиллюстрирована 57 рисунками и содержит 5 таблиц. Список использованной литературы содержит 140 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены цели и сформулированы задачи диссертационного исследования. Отмечена научная новизна, практическая ценность результатов, личный вклад диссертанта.

В первом разделе выполнен аналитический обзор существующих расчётных методов, проведен критический анализ и дана оценка применимости существующих методов для оценки тепловой неоднородности, возникающей при обработке высоким давлением в камерах инжекционного типа. На основании проведенного анализа сделан вывод, отражающий общепринятые понятия и показывающий преимущества и ограничения использования математического моделирования для иллюстрации распределения полей температур как в нагнетательной среде, так и в продукте. На основании проведенных аналитических исследований определена дальнейшая структура комплекса научных исследований по изучению тепло-гидродинамических процессов, сопровождающих обработку высоким давлением в пищевой промышленности.

Во втором разделе приведено теоретическое обоснование тепло-гидродинамических процессов при обработке высоким гидростатическим давлением. Рассмотрены геометрические размеры и конструктивные размеры оборудования. Теоретически определена реакция применяемой термопары на пошаговые изменения температуры - формула (1).

$$\frac{[T_{\infty} - T]}{[T_{\infty} - T_{нач}]} = e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}, \quad (1)$$

где T_{∞} – температура стабильной водяной бани, T – температура зонда термопары, $T_{нач}$ – начальная температура зонда термопары, t – время и τ – постоянная времени для термопары.

Для разработки соответствующей математической модели и выполнения численного моделирования определён характер потока при естественной конвекции в камере высокого давления. Поскольку в литературе нет таких сведений относительно потока при естественной конвекции на внутренней поверхности вертикального цилиндра, с целью определения типа характера потока – ламинарный или турбулентный – за приближенную вертикальную плоскость была принята внутренняя поверхность цилиндра. Такое приближение обосновывалось на соотношении, что для изотермической поверхности вертикальный цилиндр можно считать вертикальной плоской пластиной, если

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_{\frac{1}{L}}}, \quad (2)$$

где D – диаметр цилиндра, L – длина цилиндра, Gr_L – число Грасгофа с длиной в качестве характеристического размера.

Число Грасгофа – это безразмерная величина, которая применяется к системам с естественной конвекцией и определяется как отношение выталкивающих сил к силам вязкости:

$$Gr_L = \frac{L^3 g \beta (T_{нов} - T_\infty)}{\nu^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, L – характеристическая длина, β – коэффициент теплового расширения, $T_{нов}$ – температура поверхности (температура стенки), T_∞ – температура жидкости на максимальном расстоянии от объекта и ν – кинематическая вязкость.

Приведены основные уравнения, применяемые для описания процесса обработки высоким давлением.

Сохранение массы. Уравнение непрерывности – это общий баланс массы, который выполняется во всех задачах без чистого образования массы и без массопереноса.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0, \quad (4)$$

где t – время, ρ – плотность, ∇ – оператор в осесимметричных цилиндрических координатах, а \bar{V} – вектор скорости.

Сохранение импульса. Уравнение Навье-Стокса для постоянных свойств жидкости (плотность и вязкость) и турбулентного потока имеет такой вид:

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = \bar{F} + (\nu + \varepsilon_m) \nabla^2 \bar{V} - \frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (5)$$

где P – давление, ν – кинематическая вязкость, ε_m – импульс турбулентной вязкости, \bar{F} – движущая сила естественной конвекции, а риски над величинами означают, что это усреднено по времени для турбулентного потока.

Движущая выталкивающая сила для вертикального потока возникает из-за различия между массовой силой и силой, которая возникает из-за градиента гидростатического давления в окружающей среде, представленного как $g(\rho_{oc} - \rho)$, где ρ – плотность окружающей среды. Несмотря на то, что плотность жидкости принимается как константа, в уравнении импульса применяется приближение Буссинеска, поскольку различие плотностей служит причиной потока с естественной конвекцией.

Окончательное уравнение для передачи импульса в турбулентном потоке с учетом приближения Буссинеска имеет такой вид:

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = \underbrace{\hat{g}_z \beta (\bar{T} - T_{нач})}_{\text{только в направлении } Z} + (\nu + \varepsilon_m) \nabla^2 \bar{V} - \frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (6)$$

где g_z – ускорение свободного падения вдоль отрицательного направления z , β – коэффициент теплового расширения и $T_{нач}$ – начальная температура воды.

Сохранение энергии. Уравнение сохранения энергии для постоянных свойств жидкости в турбулентном потоке имеет вид:

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{T} = \nabla \cdot (\alpha + \varepsilon_t) \nabla T + \frac{Q}{\rho c_p} + \beta \bar{T} \frac{D\bar{P}}{Dt} + \frac{\mu}{\rho c_p} \varphi_v, \quad (7)$$

где α – тепловое рассеивание, ε_t – турбулентное тепловое рассеивание, Q – член уравнения, который соответствует источнику выброса (тепло химической реакции или других волюметрических источников тепла), φ_v – вязкое рассеивание (тепловая энергия, которая рассеивается вследствие теплоты

вязкой диссипации), c_p – теплоемкость, μ – динамическая вязкость.

Члены с правой стороны уравнения (7) представляют соответственно теплопроводность, источник тепла, работу сил давления и вязкое рассеивание. Второй член равен нулю, поскольку нет источника. Если расширить третий (работа сил давления) член, мы получим:

$$\beta \bar{T} \frac{D\bar{P}}{Dt} = \beta \bar{T} \left[\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{P} \right] = \quad (8)$$

$$= \beta \bar{T} \left[\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{V}_x \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \bar{V}_z \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right]. \quad (9)$$

Поскольку значительных изменений давления в жидкости (воде) не наблюдалось, мы считаем, что $(\partial \bar{P} / \partial x)$, $(\partial \bar{P} / \partial y)$, $(\partial \bar{P} / \partial z)$ равны нулю. Работа сил давления примет вид:

$$\beta \bar{T} \frac{D\bar{P}}{Dt} = \beta \bar{T} \frac{\partial \bar{P}}{\partial t}. \quad (10)$$

Четвертым членом с правой стороны уравнения (7), который представляет вязкое рассеивание, мы пренебрегаем из-за низкого градиента скорости и низкой вязкости воды. Поэтому основное уравнение для сохранения энергии в турбулентном потоке выглядит таким образом:

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{T} = \nabla \cdot (\alpha + \varepsilon_i) \nabla \bar{T} + \beta \bar{T} \frac{\partial \bar{P}}{\partial t}. \quad (11)$$

Уравнение сохранения энергии для твердой зоны (стальная стенка камеры) со стабильными физическими свойствами выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T. \quad (12)$$

Адиабатное повышение температуры. Работа, выполненная на нагнетание/сброс давления, вызывает повышение/снижение температуры как продукта, так и нагнетательной среды. Во время моделирования такое изменение температуры, вызванное изменением давления, может быть определено при допущении, что камера ВД является закрытой системой, а процесс – адиабатным, то есть тепло не передается через границы. В общем случае данный процесс описывается уравнением 13:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T \nu \beta}{c_p}, \quad (13)$$

Из уравнения (13) очевидно, что dT/dP зависит от физических величин, которые являются функцией состава образца, а эти физические свойства также зависят от температуры и давления. Это усложняет подсчет dT/dP . Для упрощения математического моделирования было принято, что эти величины являются константами, то есть считаются лишь функцией начальной температуры среды, передающей давление (воды).

Автором рассчитаны значения теплотворной способности воды во время сжатия при разных начальных температурах.

Работа давления в общем случае представлена уравнением 14:

$$\text{Работа давления} = \rho C_p \frac{dT}{dP} \frac{dP}{dt}, \quad (14)$$

где ρ – плотность воды, а c_p – теплоемкость воды.

Также показаны принятые упрощения математического моделирования, что является естественным и необходимым условием при построении любых прогностических моделей. Для согласования между численно спрогнозированными данными и данными экспериментов, особенно при повышенных начальных температурах, использовалась модель упрощенного баланса энтальпий для учета влияния добавления воды в камеру.

Были определены динамические реакции термопары на линейный входной сигнал (линейный рост температуры со временем). Упрощенный анализ теплопередачи использовался для получения отклика термопары на входное изменение температуры. Уравнение энергии нестационарного состояния для термопары, подверженной теплообмену, имеет вид:

$$m_{\text{термопары}} c_p \frac{dT}{dt} = \lambda A (T_{\text{воды}}(t) - T), \quad (15)$$

где $m_{\text{термопары}}$ – масса термопары, λ – коэффициент теплопередачи, $T_{\text{воды}}(t)$ – температура воды, в которую погружена термопара, в качестве функции времени, A – площадь поверхности.

На рис.1 схематично показана реакция термопары на переменный входной сигнал.

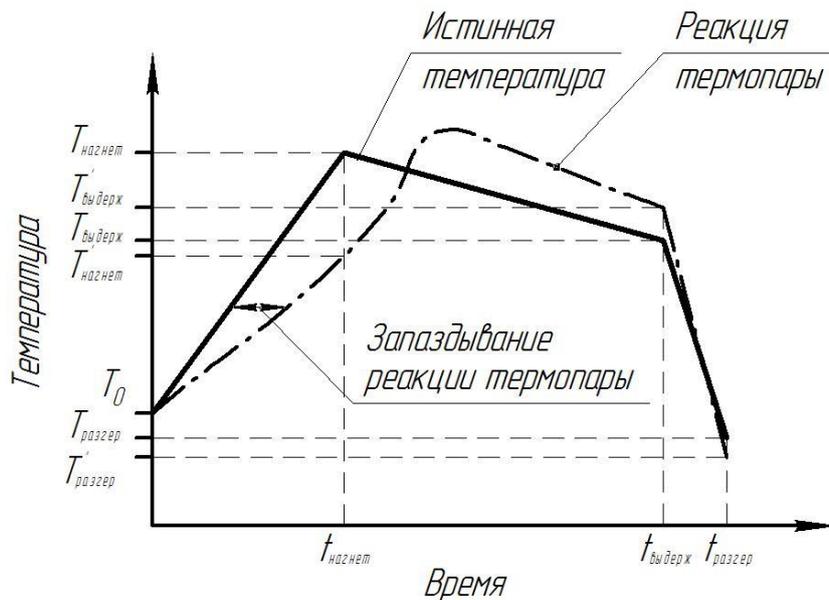


Рисунок 1 - Ожидаемая реакция термопары на линейный входной сигнал во время подачи давления, выдержки под давлением и сброса давления

Реакцию термопары на линейный входной сигнал можно получить аналитическим путем таким образом:

Для $0 < t < t_{\text{нагнет}}$ [во время нагнетания давления]

$$T' = T_0 + \tau \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \left[\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau} \right]. \quad (16)$$

Т.е. реакция термопары на линейный входной сигнал или линейное

повышение температуры во время нагнетания давления, представлена уравнением (16).

Для $t_{нагнет} \leq t \leq t_{выдержка}$ [во время выдержки под давлением]

Предполагая, что давление со временем снижается линейно при выдержке под давлением, как изображено на рис. 1, мы можем составить такое уравнение:

$$T'' = T_{нагнет} + \left(\frac{T_{выдержка} - T_{нагнет}}{t_{выдержка} - t_{нагнет}} \right) [t - t_{нагнет} - \tau] + \left[T'_{нагнет} - T_{нагнет} + \tau \left(\frac{T_{выдержка} - T_{нагнет}}{t_{выдержка} - t_{нагнет}} \right) \right] e^{-\frac{(t-t_{нагнет})}{\tau}}. \quad (17)$$

Таким образом, реакция термопары во время выдержки под давлением определяется уравнением (17), где $T'_{нагнет}$ – температура, которая зафиксирована термопарой в конце нагнетания давления.

Для $t_{выдержка} \leq t \leq t_{сброс}$ [во время сброса давления]

Предполагая, что температура линейно уменьшается во время сброса давления, как показано на рис. 1, мы можем составить следующее уравнение:

$$T''' = T_{выдержка} + \left(\frac{T_{сброс} - T_{выдержка}}{t_{сброс} - t_{выдержка}} \right) [t - t_{выдержка} - \tau] + \left[T''_{выдержка} - T_{выдержка} + \tau \left(\frac{T_{сброс} - T_{выдержка}}{t_{сброс} - t_{выдержка}} \right) \right] e^{-\frac{(t-t_{выдержка})}{\tau}} \quad (18)$$

Таким образом, реакция термопары во время сброса давления определяется уравнением (18), где $T''_{выдержка}$ – это температура, считываемая термопарой в конце периода выдержки под давлением, полученная из уравнения (17) при t , равном $t_{выдержка}$.

Уравнения (16), (17) и (18) могут и будут использоваться для прогнозирования реакции термопары, имеющей постоянную времени τ , во время нагнетания давления, выдержки под давлением и сброса давления соответственно, учитывая фактическое изменение измеряемой температуры. Обычно во время эксперимента с ВД регистрируют температуру, измеренную термопарой, то есть изменения T' , T'' , и T''' в зависимости от t . Однако главный интерес состоит в том, чтобы узнать истинное изменение температуры ($T_{воды}$) во времени из экспериментально записанных данных (T' , T'' , и T''' от t).

Имея исходные значения T' , T'' , и T''' по фактическим данным исследований, мы можем подсчитать «истинное» изменение температуры воды как функцию времени, преобразовав уравнения (16), (17) и (18).

Для $0 < t < t_{нагнет}$ [во время нагнетания давления]

$$T_{воды} = T_o + \frac{(T' - T_o)t}{\tau \left[\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right]}. \quad (19)$$

Уравнение (19) используется для прогнозирования скорректированного «истинного» изменения температуры воды со временем t во время нагнетания давления на основе измеренного изменения T' .

Для $t_{нагнет} \leq t \leq t_{выдержка}$ [во время выдержки под давлением]

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{нагнет}} + (t - t_{\text{нагнет}}) \left[\frac{T'' + T_{\text{нагнет}} \left(e^{-\frac{(t-t_{\text{нагнет}})}{\tau}} - 1 \right) - T'_{\text{нагнет}} e^{-\frac{(t-t_{\text{нагнет}})}{\tau}}}{t - t_{\text{нагнет}} + \tau e^{-\frac{(t-t_{\text{нагнет}})}{\tau}} - \tau} \right]. \quad (20)$$

Уравнение (20) использовалось для прогнозирования скорректированного или «истинного» изменения температуры воды во время выдержки под давлением на основе измеренного изменения T'' .

Для $t_{\text{выдержк}} \leq t \leq t_{\text{сброс}}$ [во время сброса давления]

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{выдержк}} + (t - t_{\text{выдержк}}) \left[\frac{T''' + T_{\text{выдержк}} \left(e^{-\frac{(t-t_{\text{выдержк}})}{\tau}} - 1 \right) - T''_{\text{выдержк}} \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{выдержк}})}{\tau}}}{t - t_{\text{выдержк}} + \tau \cdot e^{-\frac{(t-t_{\text{выдержк}})}{\tau}} - \tau} \right]. \quad (21)$$

Уравнение (21) использовалось для прогнозирования скорректированного или «истинного» изменения температуры воды во время сброса давления на основе измеренного изменения T''' .

Следовательно, «истинное» изменение температуры воды в местах расположения термопар во время нагнетания давления, выдержки под давлением и сброса давления может быть спрогнозировано уравнениями (19), (20) и (21), соответственно, на основе изменения температур T' , T'' , и T''' со временем t .

В третьем разделе проведено численное моделирование теплообмена и потока жидкости для установки высокого давления, которая использовалась во время экспериментальных исследований с помощью коммерческой программы для вычислительной гидродинамики на основе метода конечных элементов ANSYS *Fluent* (версия 19.5). Основные уравнения сохранения массы, импульса и энергии, описанные во втором разделе, были численно решены для принятой расчетной области (рис. 2), при прогнозировании полей скоростей и температур в передающей среде с повышенным давлением и уравнения энергии, решенного для стенки камеры.

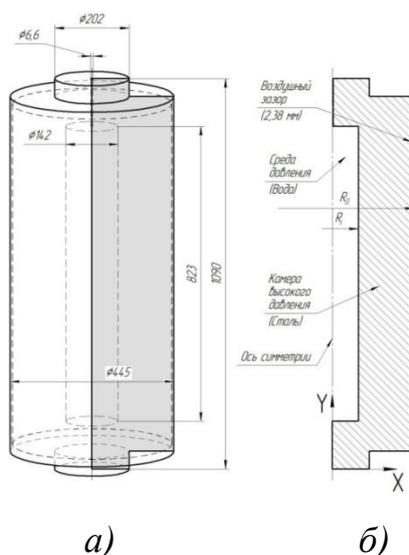


Рисунок 2 - (а) - Размеры камеры для ОВД. Затемненный участок обозначает радиальную область для математического моделирования, (б) – расчетная область для моделирования, $R_i = 71$ мм, $R_o = 223$ мм

С целью сравнения экспериментальных данных с численно спрогнозированными, на вычислительной области были определены точки, соответствующие положению термопар в радиальном и вертикальном направлениях (рис. 3).

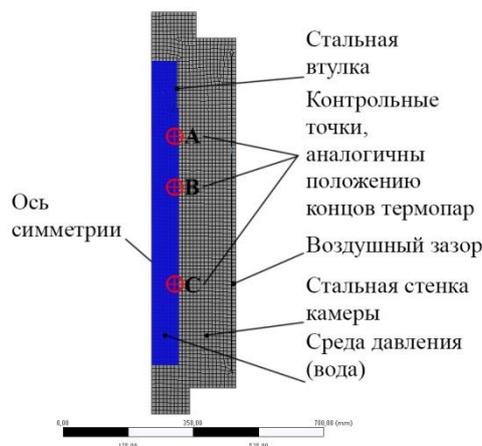


Рисунок 3-Расчетная сетка, примененная при математическом моделировании

Разработана и проверена на предмет размеров области, статистики объема и статистики по фронтальному срезу расчетная сетка, сгенерированная с помощью *ANSYS Mesh*, которая была импортирована в программу *ANSYS Fluent*. Для математического моделирования теплового и скоростного полей был использован предусмотренный в программе алгоритм решения неустойчивого уравнения. Естественная конвекция в воде моделировалась с использованием приближения Буссинеска. При таком подходе плотность воды рассматривалась как постоянное значение во всех решаемых уравнениях, за исключением члена выталкивающей силы в уравнении количества движения.

Уравнения потока жидкости и теплопередачи для прогнозирования распределения температуры во время процесса обработки давлением были адаптированы для включения теплофизических свойств воды при комбинированной зависимости давления от температуры и приняли вид уравнений (21-23).

$$\rho(P, T) = 1155,41 - 0,5(T) + (t), \quad (21)$$

$$k(P, T) = 0,18 + 1,4 \cdot 10^{-4}(T) + 1,1 \cdot 10^{-4}(t), \quad (22)$$

$$\mu(P, T) = 3,7 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-6}(T) + 1,5 \cdot 10^{-6}(t). \quad (23)$$

Данные уравнения были включены в программу численного моделирования с использованием модуля пользовательских функций (*UDF*) *ANSYS Fluent*.

Чтобы компенсировать уменьшение объема в камере при подаче воды в камеру на период повышения давления, определено значение граничной скорости подачи передающей давление среды.

В четвертом разделе приведены результаты численного моделирования, показавшие, что нагрев в результате сжатия происходит неоднородно в

нагнетательной среде (воде) и вызывает повышение температуры среды. Был установлен градиент температуры между средой и более холодной стенкой камеры, который приводит к теплообмену между водой и массивной стенкой камеры. Полученное различие плотности приводит к образованию конвекционных потоков внутри нагнетательной среды (воды). Чтобы подчеркнуть важность образования конвекции в модели, было спрогнозировано распределение температуры для случая без конвекции (рис. 4), в сравнении со случаем, когда происходит сопряженный теплообмен (проводимость и конвекция) (рис. 5).

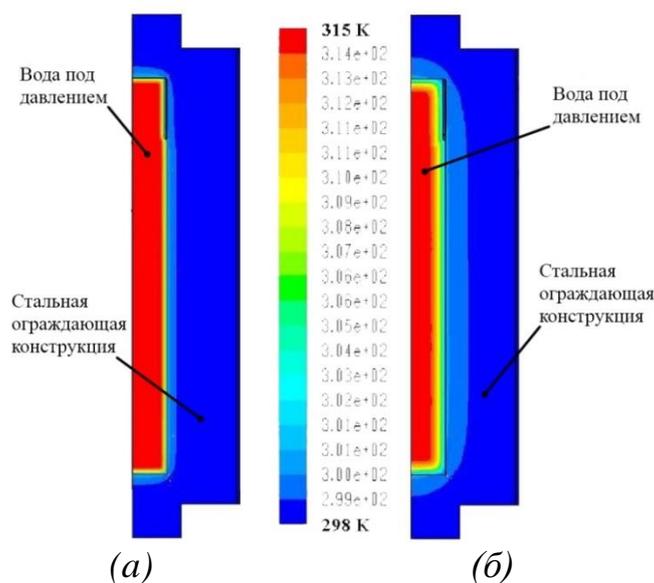


Рисунок 4 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 298,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с) только при теплопроводности

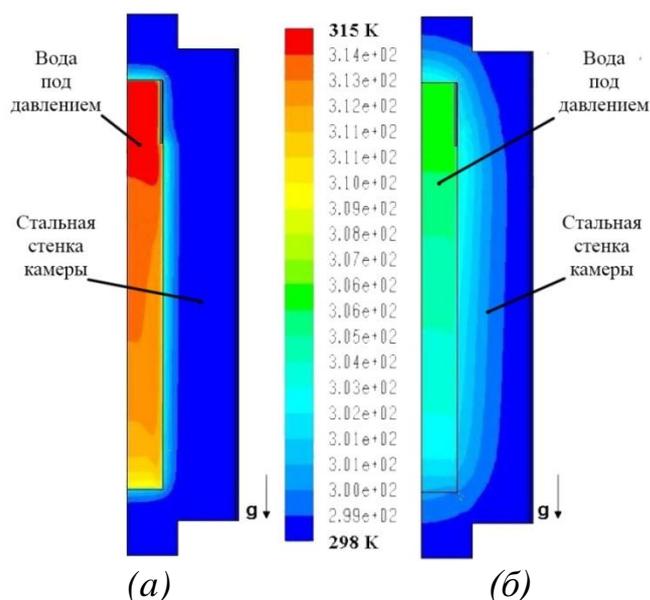
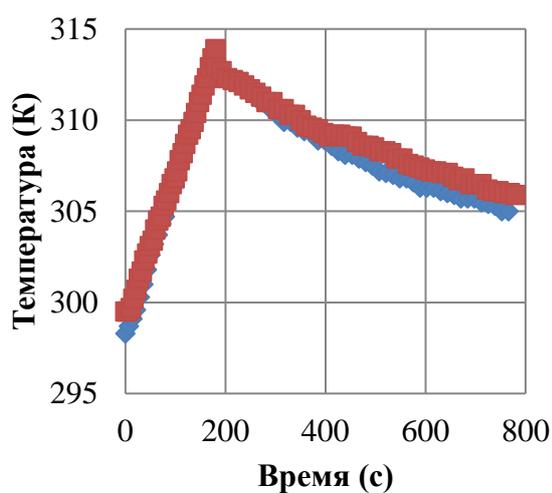
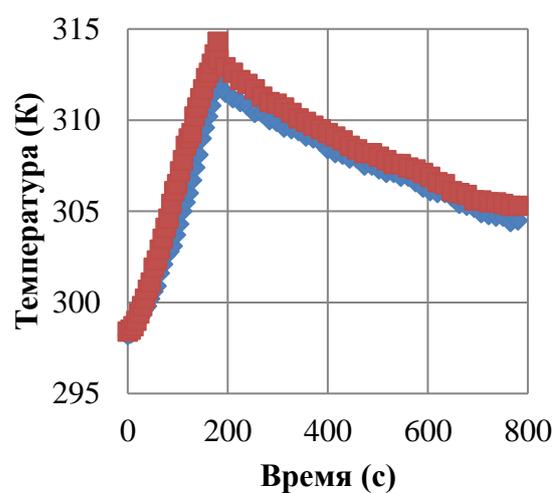


Рисунок 5 - Изотермы в воде и камере $T_{нач} = 298,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапе выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче и турбулентном потоке

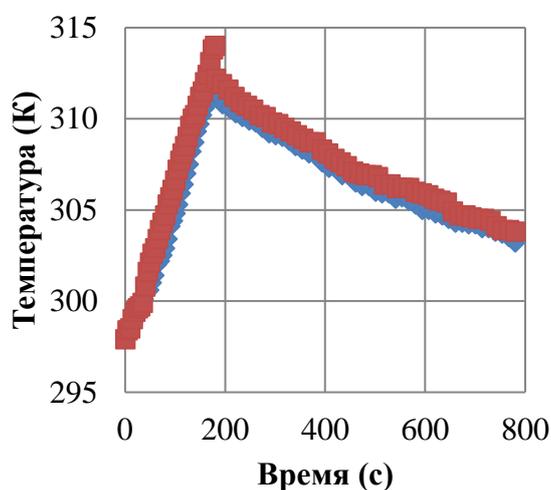
Значения времени и температуры в период нагнетания давления и в период выдержки под ВД были экспериментально зафиксированы в трех точках термопар в камере для ОВГД, а также численно спрогнозированы для точек при разных начальных температурах с целью подтверждения численного моделирования. На рис. 6 и 7 представлены сравнения между скорректированными экспериментальными (где экспериментальные данные были откорректированы с учетом времени реакции термопар с помощью уравнений (17), (18) и (19) и численно спрогнозированными изменениями температуры во времени $T_{нач}=298,15$ К и $T_{нач} = 288,15$ К соответственно. Максимальная поправка температуры на инертность термопары принята 2 К.



(а)



(б)



(в)

—◆— Численно спрогнозированные значения
 —■— Корректированные экспериментальные значения

Рисунок 6 - Сравнение скорректированных экспериментальных и численно спрогнозированных временно-температурных изменений при $T_{нач} = 298,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

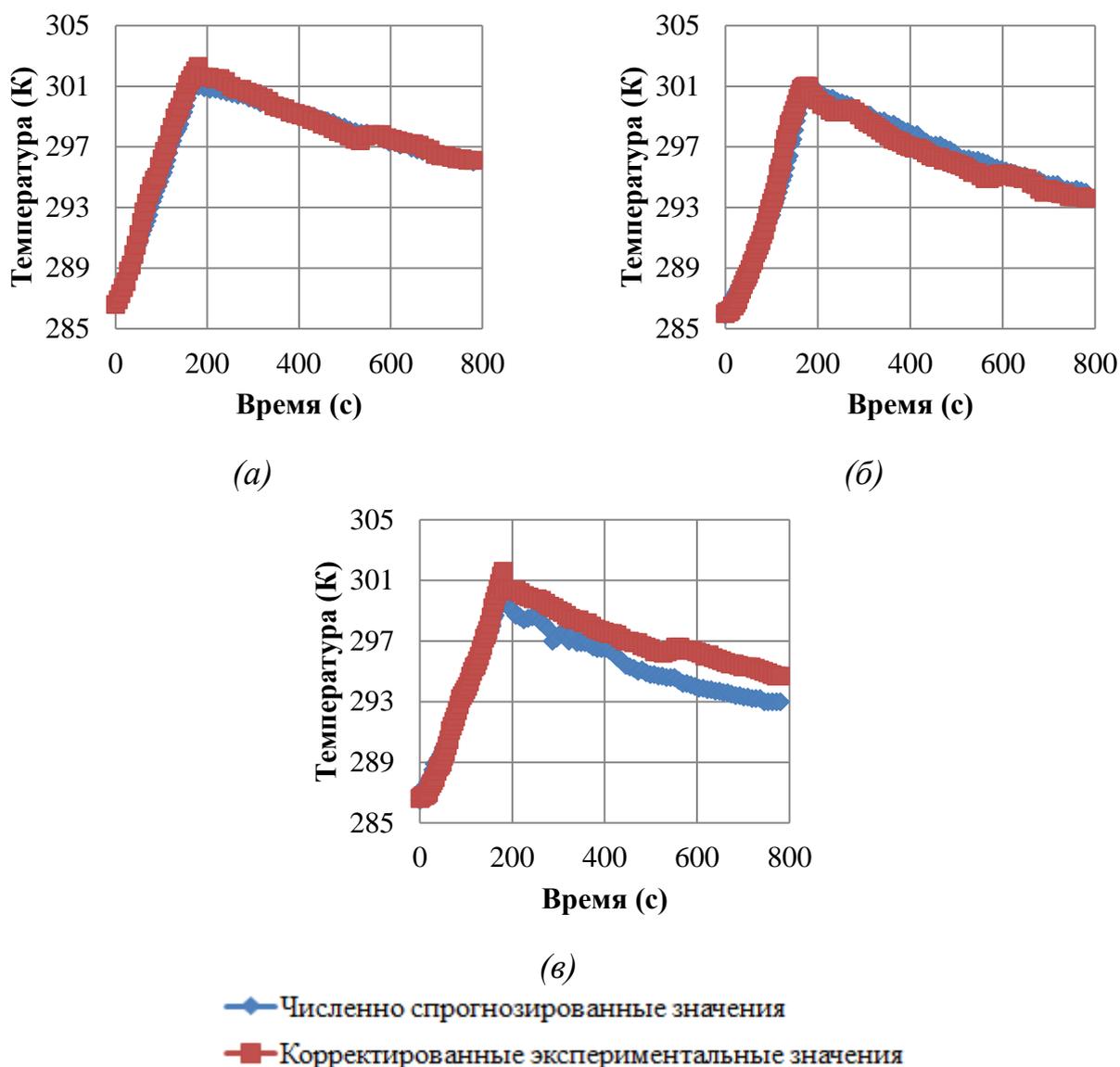
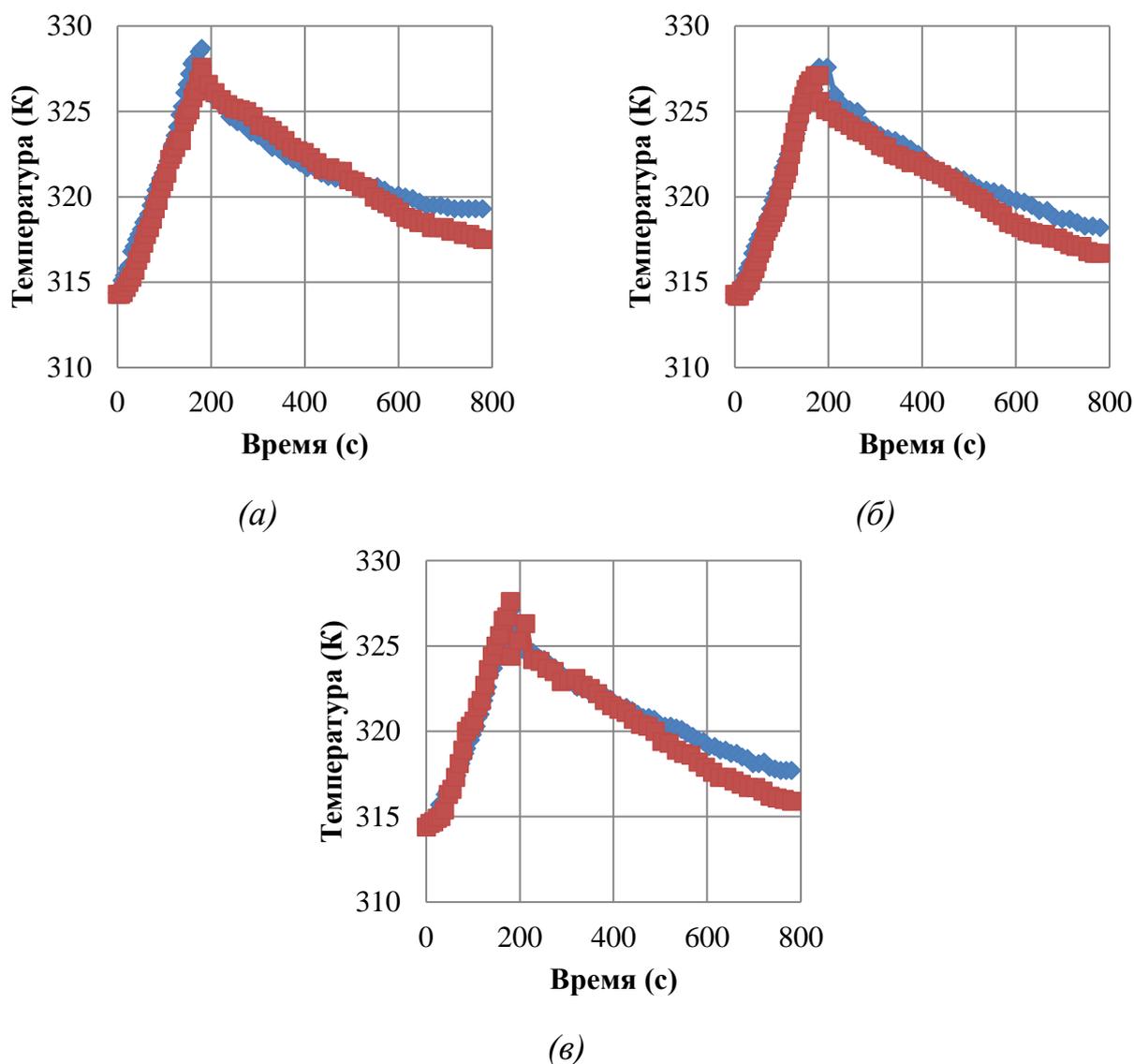


Рисунок 7 - Сравнение скорректированных экспериментальных и численно спрогнозированных временно-температурных изменений при $T_{нач} = 288,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

Несоответствие между численно спрогнозированными данными и данными эксперимента при повышенной начальной температуре можно объяснить тем фактом, что добавленная в систему вода для компенсации уменьшения объема из-за сжатия подается в систему при температуре значительно ниже, чем вода в камере. Была введена поправка простого баланса энтальпий для численно спрогнозированной температуры с целью учета добавления воды через верхнюю заглушку. На рис. 8 и рис. 9 изображено сравнение между скорректированными численно представленными и скорректированными экспериментальными данными при $T_{нач} = 313,15$ К и $T_{нач} = 333,15$ К.



—◆— Корректированные численно спрогнозированные значения
 —■— Корректированные экспериментальные значения

Рисунок 8 - Сравнение скорректированного экспериментального и скорректированного численно спрогнозированного временно-температурного изменения при $T_{нач} = 313,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

Для сравнения температурных профилей при разной начальной температуре профили безразмерной температуры были преобразованы в графики в качестве функции безразмерного расстояния в горизонтальной и вертикальной плоскости. Температура была приведена к безразмерной величине по отношению к максимальной температуре на плоскости $[(T - T_{нач}) / (T_{max} - T_{нач})]$ и расстоянием с длиной столба (L) и радиусом (Ri) для вертикальной плоскости ($-z/L$) и горизонтальной средней плоскости (r/Ri) соответственно.

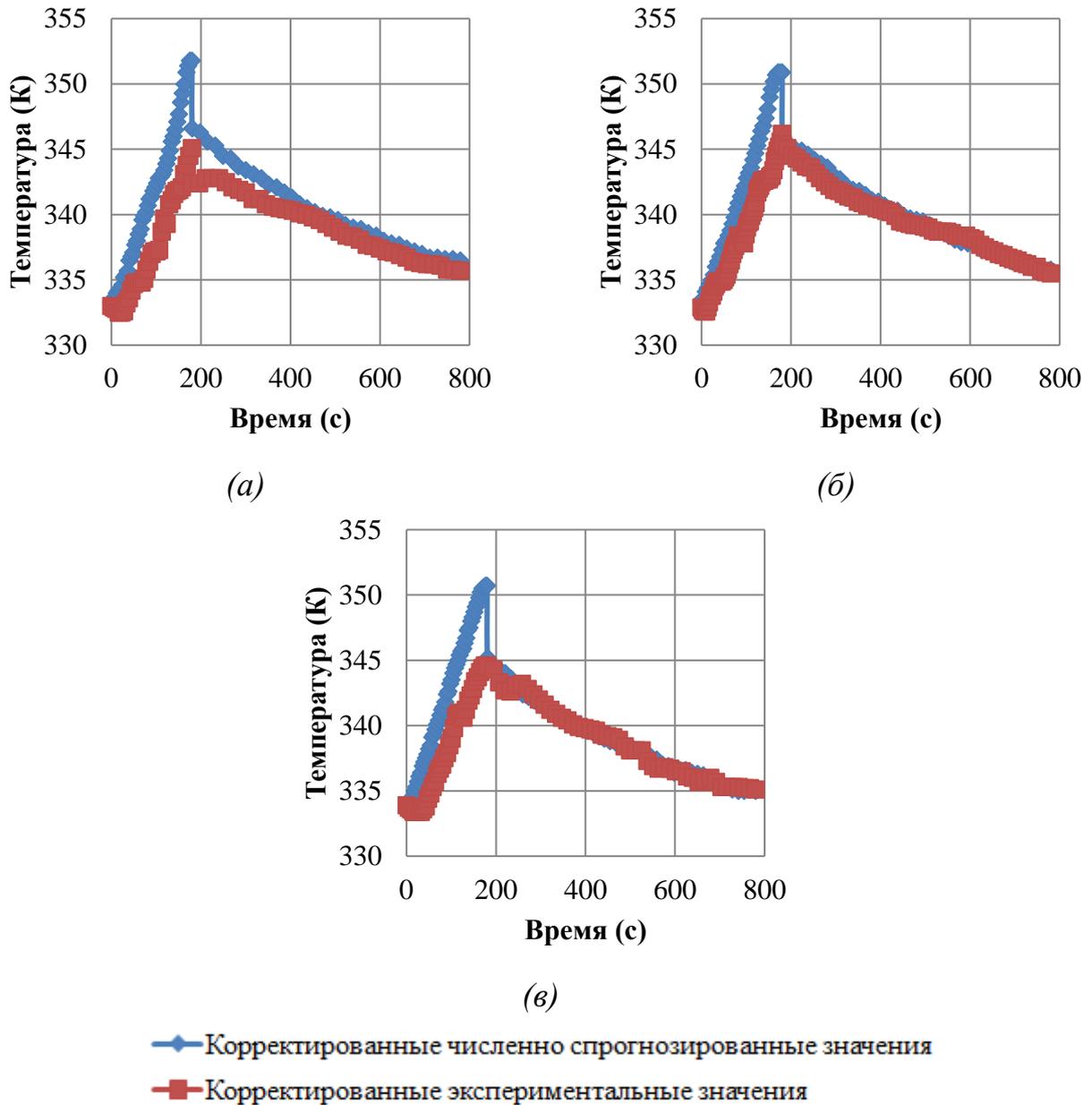


Рисунок 9 - Сравнение скорректированного экспериментального и скорректированного численно спрогнозированного временно-температурного изменения при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

Установлено, что профили безразмерной температуры вдоль оси камеры в столбе жидкости (рис.10) при разных начальных температурах были подобны и вдоль радиального расстояния на горизонтальной средней плоскости в воде (рис.11). Радиальное распределение температуры было однородным по большей части области, кроме участков близ стенок, на которые начальная температура не влияет.

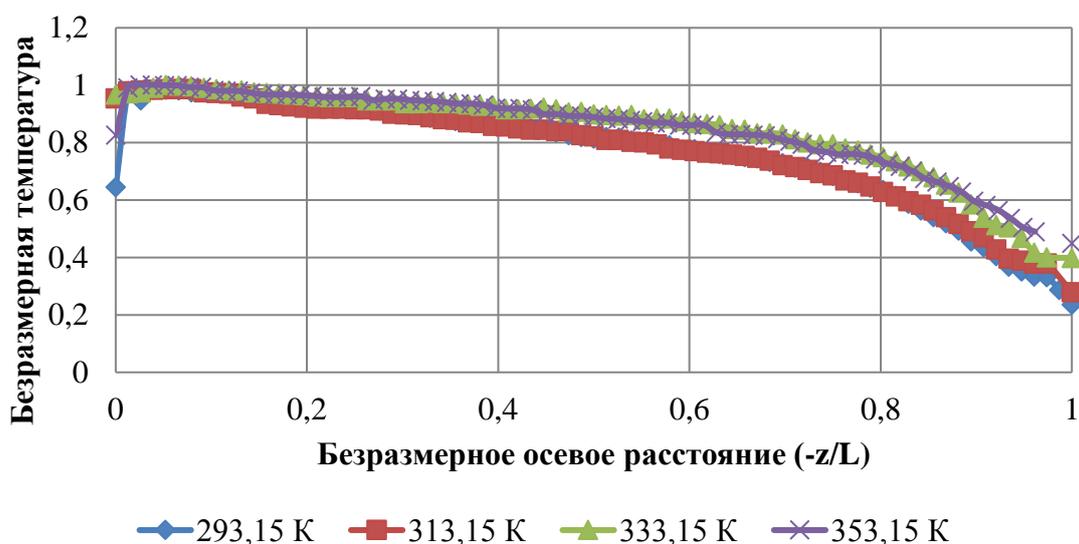


Рисунок 10 - Численно спрогнозированный безразмерный температурный профиль вдоль вертикальной оси, при разных значениях $T_{нач}$

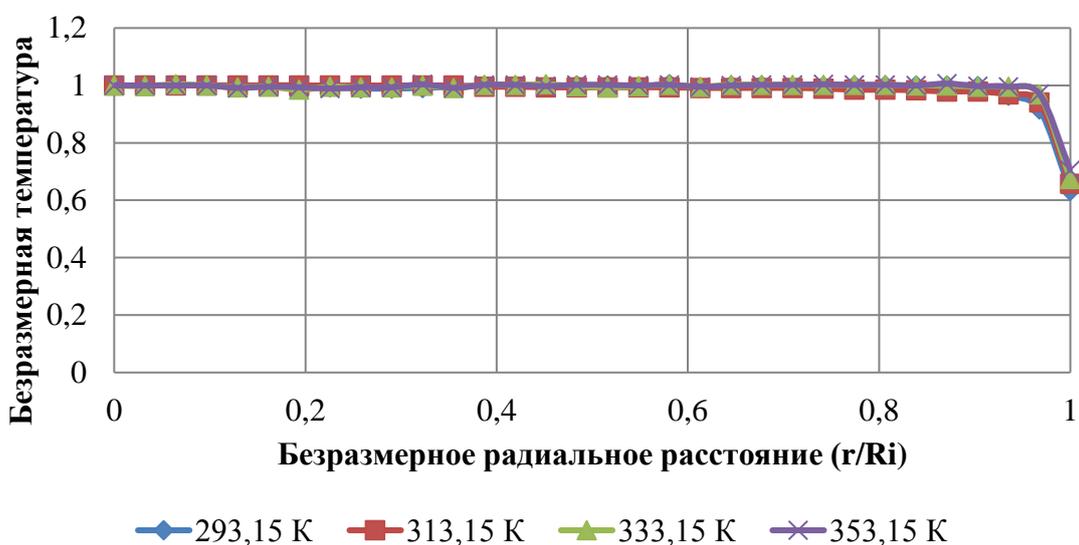
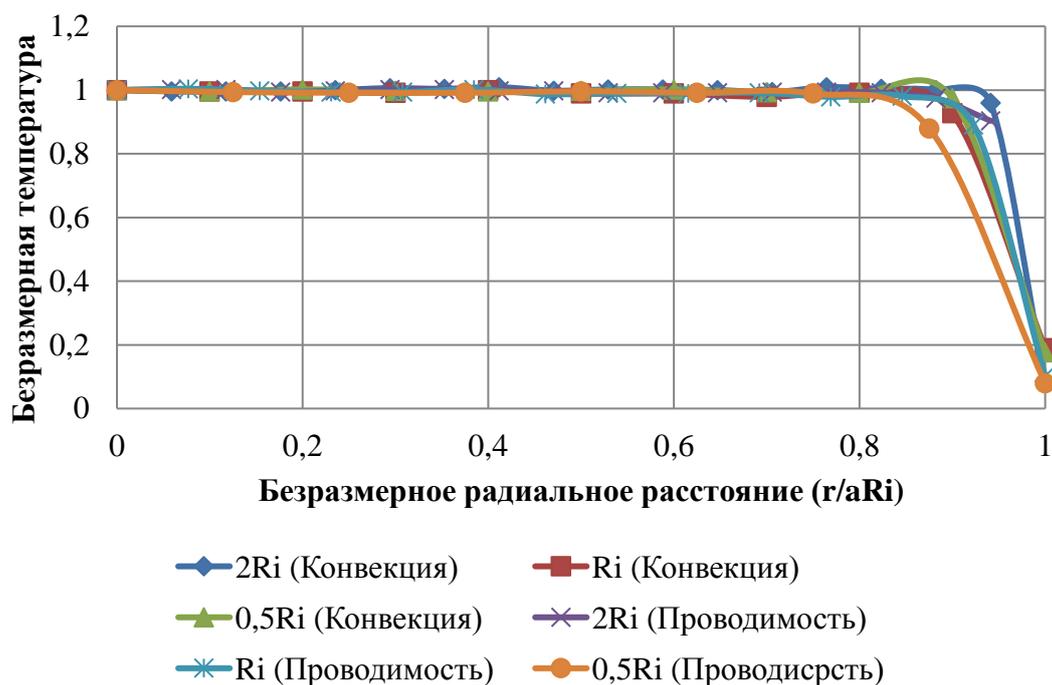


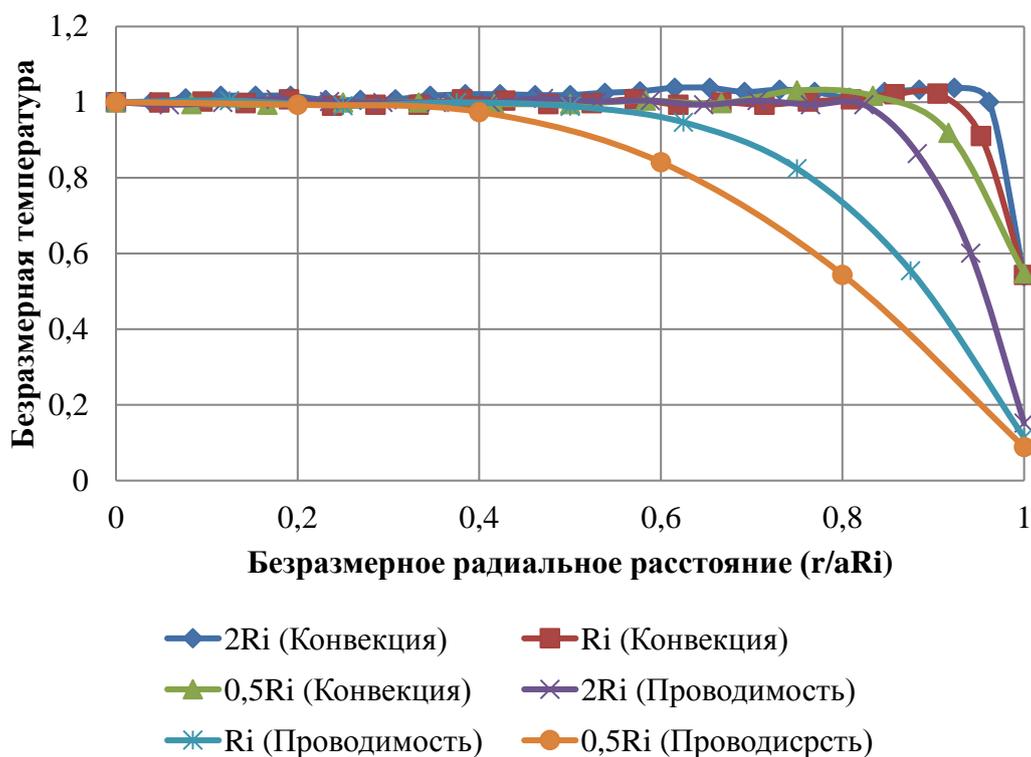
Рисунок 11 - Численно спрогнозированный профиль безразмерной температуры вдоль радиального расстояния в воде в горизонтальной средней плоскости, при разных значениях $T_{нач}$

Программа математического моделирования была также использована для изучения влияния размера камеры на распределение температуры в воде. В этом случае была использована более простая осесимметричная геометрия с прямыми верхним и нижним уплотнителями. Были проведены сравнения как для случая лишь проводимости (без влияния гравитации) и сопряженной теплопередачи (проводимость и конвекция). Влияние размера камеры на численно спрогнозированные температурные профили для случая лишь проводимости и сопряженной теплопередачи вдоль горизонтальной средней плоскости камеры представлены на рис. 12 (а) в конце нагнетания давления и на рис. 12 (б) в конце периода выдержки для трех разных размеров камеры: высота для них была принята одинаковая, изменялся лишь внутренний радиус

($2Ri$, Ri и $0,5Ri$). С целью исключительно математического моделирования толщина стенки камеры не изменялась. Радиальное расстояние было приведено к безразмерной величине по отношению к aRi , где a – имеет значение 2, 1 и 0,5.



(а)



(б)

Рисунок 12 - Численно прогнозируемое безразмерное изменение температуры вдоль горизонтальной средней плоскости для камер с разным внутренним радиусом в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) период выдержки (780 с) только для проводимости и сопряженной теплопередачи

Как видно из рис. 12(а) и рис. 12(б), в результатах в случае лишь проводимости распределение безразмерной температуры $(T-T_{нач})/(T_{max}-T_{нач})$ становится более однородным вдоль безразмерного радиального расстояния с увеличением размера камеры. Таким образом, во время сопряженной теплопередачи (проводимость и конвекция) можно наблюдать, что для камер с радиусом $2Ri$ характерным было однородное распределение вдоль большего расстояния в сравнении с камерами с меньшими радиусами, но с незначительными отличиями.

Между случаями лишь проводимости и сопряженной теплопередачи наблюдалась тенденция конвекции вблизи стенки, способная влиять на температуру и способствовать более однородному распределению температуры по сравнению с соответствующим случаем лишь конвекции, которая является очевидным из рис. 12.

Как уже было сказано раньше, температура воды является более важной, когда используется сочетание начальной высокой температуры и ВД, в частности, для инактивации спор. Программа математического моделирования использовалась для прогнозирования распределения температуры в камере с термоизоляционной вставкой при повышенной начальной температуре, то есть $T_{нач} = 60^{\circ}\text{C}$ (333,15 К).

Численное моделирование проводилось при начальной температуре 60°C (333,15 К) и нагнетании давления до 586 МПа. Оригинальная геометрия камеры была изменена для учета термоизоляционной вставки различной толщины (3,175 мм и 12 мм). Полученные результаты сравнивались для случая использования и неиспользования термоизоляционной вставки при 60°C (333,15 К). На рис. 13 и рис.14 изображены изотермы в конце нагнетания давления (180 с) и в конце выдержки (780 с) соответственно.

Как можно увидеть (рис. 13), максимальная температура воды в камере составляла 355 К для камеры с изоляцией 12 мм, а также 3,175 мм, в сравнении со случаем без использования изоляции, когда максимальная температура составляла 350 К в конце нагнетания давления. В конце периода выдержки (рис. 14) максимальная температура сохранялась на более длинном вертикальном участке в камере с изоляцией толщиной 12 мм.

Эти результаты также показывают, что увеличение толщины термоизоляции приводит к снижению изменения температуры воды. Для определения, достаточной ли является толщина, необходима оптимизация толщины термоизоляции по отношению к технологическим требованиям.

Направления потоков в конце периода выдержки для случаев с и без использования термоизоляции представлены на рис. 15.

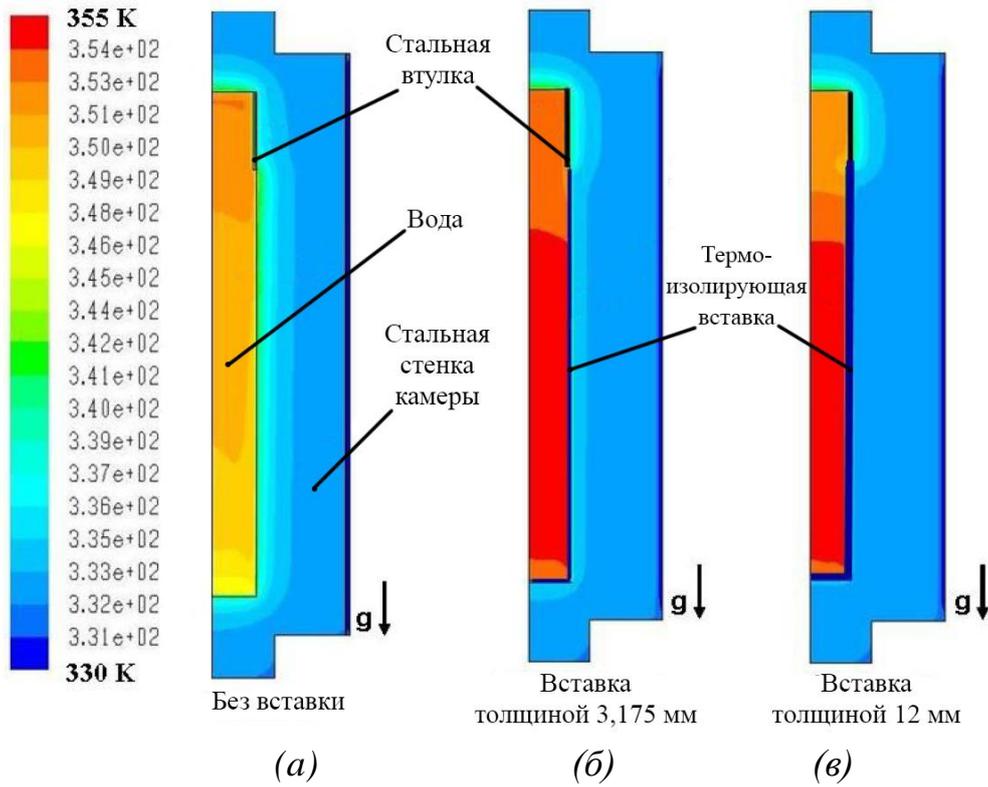


Рисунок 13 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термоизоляции разных толщин в конце нагнетания давления

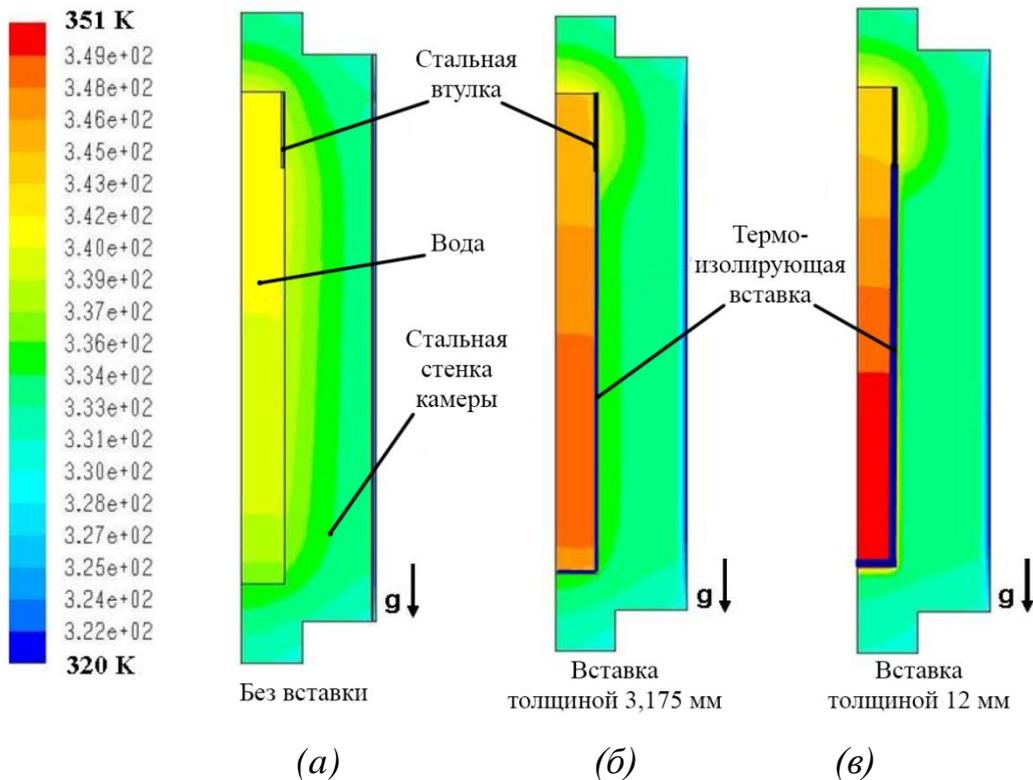


Рисунок 14 - Изотермы в воде и стенке $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термоизоляции разных толщин в конце периода выдержки (780 с)

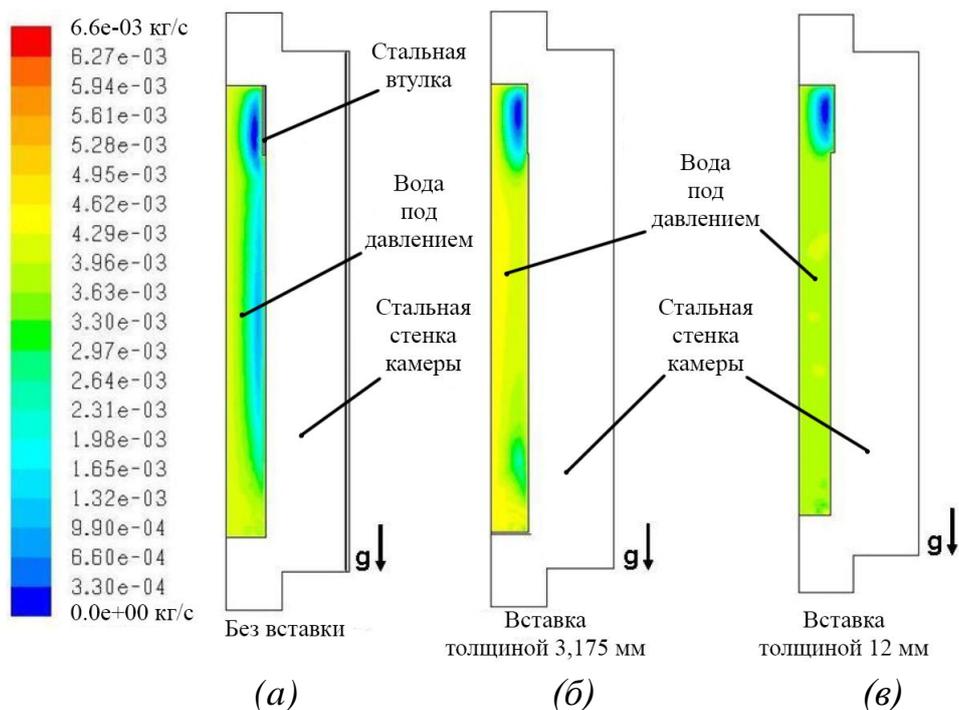


Рисунок 15 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$, $P = 586 \text{ МПа}$, для термоизоляции разных толщин в конце периода выдержки (780 с)

Для лучшего понимания распределения температуры с использованием термоизоляционной вставки в камере, были построены графики профилей безразмерной температуры вдоль радиальной и аксиальной плоскостей. Значения температуры были переведены в безразмерные по отношению к максимальной температуре на соответствующих плоскостях. Радиальное и аксиальное расстояния были приведены к безразмерной величине по отношению к R_{max} и L соответственно. На рис. 16 и 17 изображены профили безразмерной температуры на радиальной и аксиальной плоскостях соответственно.

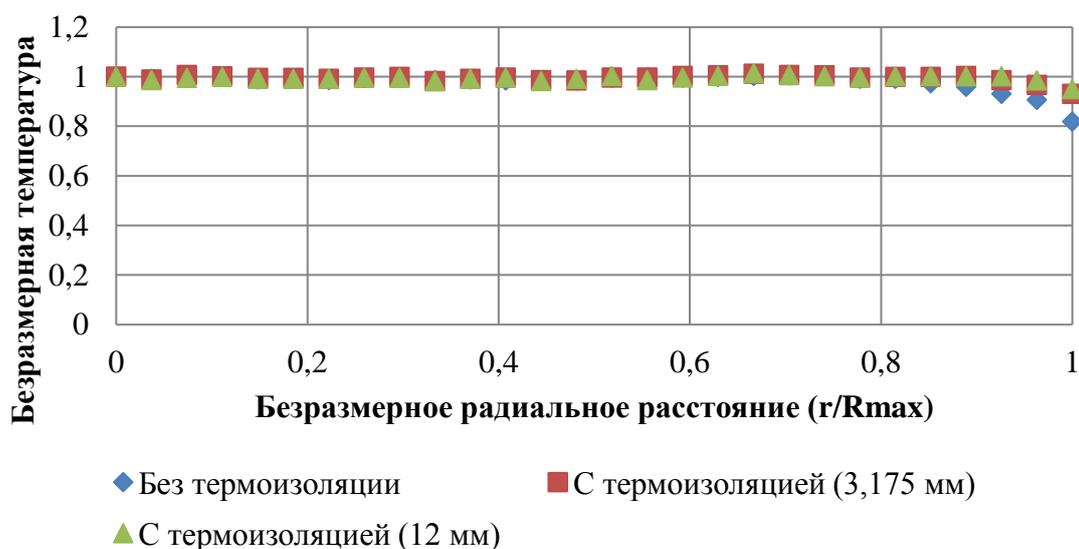


Рисунок 16 - Численно полученные профили безразмерной температуры вдоль радиального расстояния в воде по горизонтальной средней плоскости в конце периода выдержки (780 с)

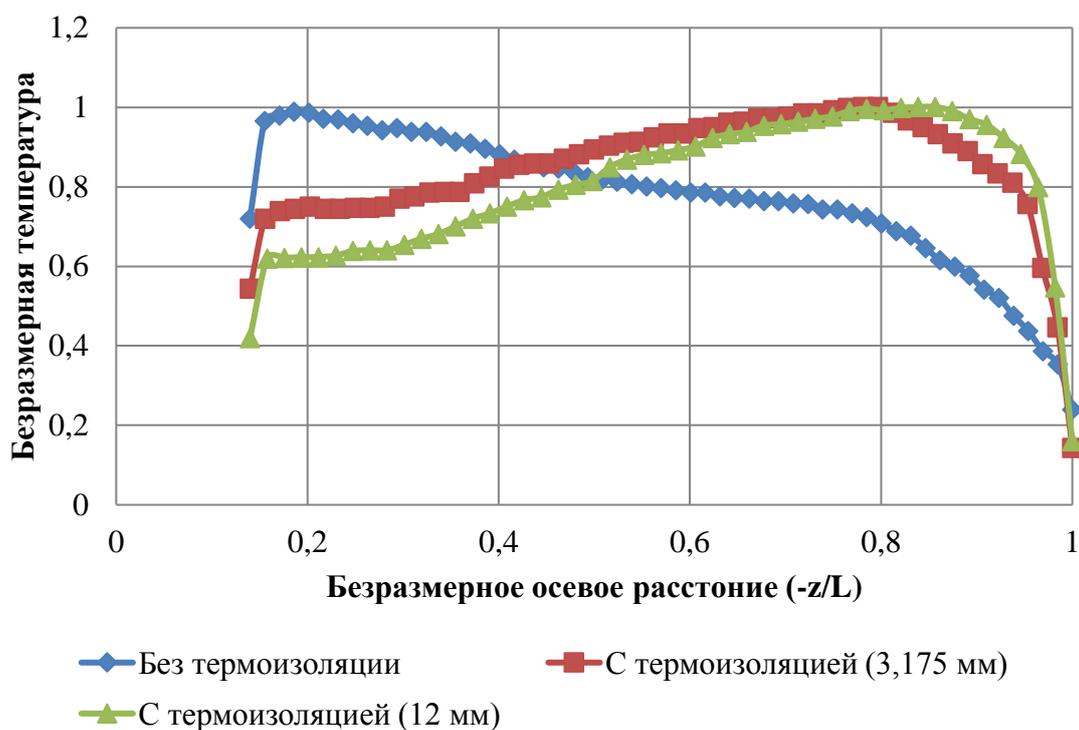


Рисунок 17 - Численно полученные профили безразмерной температуры вдоль аксиального расстояния в воде по вертикальной плоскости в конце периода выдержки под давлением (780 с)

Как видно, установка термоизоляционной вставки не оказывает значительного влияния на радиальное распределение температуры (рис.16), тогда как аксиальное распределение становится более однородным в сравнении со случаем, когда изоляции нет (рис. 17).

ВЫВОДЫ

1. Выполнено численное моделирование распределения температуры внутри камеры для обработки продуктов питания высоким давлением. Полученные результаты математического моделирования подтверждены данными экспериментов относительно температурно-временной зависимости в выбранных точках.

2. В нагнетательной среде (воде) возникает неоднородность температуры во время обработки высоким давлением из-за адиабатного нагрева при сжатии и потери теплоты на стенках камеры. Неоднородность усиливается в период выдержки под давлением вследствие охлаждения естественной конвекцией на стенках камеры.

3. Результаты моделирования свидетельствуют, что при сопряженной теплопередаче, которая происходит в камере ВД, возникает колебание температуры в 6 К, когда начальная температура составляла 298,15 К, а давление выдерживается на уровне 586 МПа. Также когда обработка начинается при повышенных температурах, распределение температуры становится более неоднородным в конце нагнетания давления и выдержки под давлением. С

помощью математического моделирования был получен результат колебания температуры в 10 К в конце периода выдержки под давлением при начальной температуре 353,15 К и давлением выдержки 586 МПа.

4. Полученная математическая модель подтвердила гипотезу о том, что увеличение размера камеры может уменьшить неоднородность температуры в нагнетательной среде.

5. Установлено, что самый холодный участок в камере ВД был вблизи стенки или близ нижней заглушки камеры (когда добавление воды сверху камеры не учитывалось), но это явление приобретало противоположные признаки при установке термоизолирующей вставки в камере, то есть самым холодным участком становилась зона возле верхнего уплотнителя. Доказано, что установка термоизолирующей вставки уменьшает неоднородность температуры в нагнетательной среде.

Перечень работ, опубликованных по материалам диссертации

Статьи в научных изданиях:

1. Соколов, С. А. Моделирование тепломассопереноса в камерах высокого давления с инжекционным подводом рабочей среды / С. А. Соколов, Ю. А. Селезнева, **Д. С. Афенченко** // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 1-4. – С. 103-109. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27380778>) Загл. с экрана. Текст электронный.

2. Петрова Ю.Н., Декань А.А., **Афенченко Д.С.** Компьютерный инженерный анализ некоторых элементов оборудования пищевой и перерабатывающей промышленности // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. раб. – Вып. 5(38). –2018. Донецк, ГО ВПО «ДонНУЭТ имени Михаила Туган-Барановского» ISSN 2079-4827 (Режим доступа: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=39924)

3. Верификация аналитического расчёта несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса / **Д.С. Афенченко**, Ю. Н. Петрова, М. Э. Устинова, Р. Е. Олейникова // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2019. – № 4. – С. 118-129. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41587856>). Загл. с экрана. Текст электронный.

4. Influence of high pressure treatment on the rheological characteristics of fish paste / S. Sokolov, **D. Afenchenko**, A. Malich [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 сентября 2019 года. – Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012233. – DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012233. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43240804>) Загл. с экрана. Текст электронный.

5. **Д.С. Афенченко**, Н.Н. Севаторов. Аналитическое определение реакции термопар в камере высокого давления на изменение входного сигнала // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. раб. – 2021.

– Вып. 15(48). – 122 с. Донецк, ГО ВПО «ДонНУЭТ имени Михаила Туган-Барановского».

Материалы научно-практических конференций:

6. **Афенченко, Д. С.** Топологизация конструктивных элементов оборудования средствами конечно-элементного комплекса ANSYS на примере камеры высокого давления / Д. С. Афенченко, В. П. Головинов, А. А. Яшонков // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования : Материалы II Национальной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ ВО «КГМТУ», Керчь, 15–17 мая 2019 года. – Керчь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2019. – С. 451-456. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38141940>). Загл. с экрана. Текст электронный.

7. Исследование границ применимости некоторых расчетных формул сопротивления материалов / Ю. Н. Петрова, В. С. Вакулук, **Д. С. Афенченко**, Ю. А. Катанаева // Математическое моделирование и краевые задачи : Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием: в 2х томах, Самара, 27–30 мая 2019 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 140-143. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38559740>). Загл. с экрана. Текст электронный.

8. Петрова, Ю. Н. Применение конечно - элементного комплекса ANSYS для определения предельных характеристик конструктивных элементов / Ю. Н. Петрова, **Д. С. Афенченко** // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : Юбилейный сборник научных трудов XIII международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Донского государственного технического университета (Ростовского-на-Дону института сельхозмашиностроения), в рамках XXIII Агропромышленного форума юга России и выставки "Интерагромаш". В 2-х томах, Ростов-на-Дону, 26–28 февраля 2020 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2020. – С. 78-81. – DOI 10.23947/interagro.2020.2.78-81. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43073847>). Загл. с экрана. Текст электронный.

9. **Афенченко, Д. С.** Моделирование движения слоя креветок средствами конечно-элементного комплекса ANSYS / Д. С. Афенченко, В. Р. Блинов, Ю. И. Павлова // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства : Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции, Керчь, 14–17 мая 2020 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – С. 197-199. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42922982>). Загл. с экрана. Текст электронный.

10. **Афенченко, Д. С.** Особенности моделирования, виброкипящего слоя средствами Rocky DEM / Д. С. Афенченко, В. Р. Блинов, Ю. И. Павлова // Сборник тезисов докладов участников пула научно-практических конференций, Керчь, 25–28 января 2021 года / под общ. ред. Масюткина Е. П. ; Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского ; Керченский государственный морской технологический университет ; Луганский государственный педагогический университет. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2021. – С. 54-56. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44796543>). Загл. с экрана. Текст электронный.

11. **Афенченко, Д. С.** Моделирование движения креветок в сушильной камере средствами Rocky DEM / Д. С. Афенченко, В. Р. Блинов // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства : Сборник тезисов докладов участников II Международной научно-практической конференции, Керчь, 19–23 мая 2021 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2021. – С. 70-73. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45833140>). Загл. с экрана. Текст электронный.

Монографии:

12. Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов [Коллективная монография] / Соколов С.А., Стеблянка В.Г., Севаторов Н.Н., Афенченко Д.С. [и др.]. / Харьков: Изд-во «НТМТ», 2016. - 625 с.

13. Теоретическое обоснование инновационных методов обработки продуктов питания, сырья и создание технологического оборудования / С. А. Соколов, С. Н. Шестов, Д. С. Афенченко [и др.]. – Донецк; Севастополь : Цифровая типография, 2018. – 373 с. – ISBN 978-5-6041537-0-3. (Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37243218>). Загл. с экрана. Текст электронный.

Патенты:

14. Пат. 83643 Украина; МПК А22С7/00. Способ производства ветчины куриной "Дуэт" с использованием высокого давления / Сукманов В.А., Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Декань А.А., Гура А.В., **Афенченко Д.С.**, Селезнева Ю.А.; заявитель и владелец Донецк. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – № u201302473; заявл. 27.02.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. 18/2013 - 2 с.

15. Пат. 83644 Украина; МПК А22С21/00. Способ производства реструктурированной ветчины "Раббитныча" из мяса кролика / Сукманов В.А., Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Декань А.А., Гура А.В., **Афенченко Д.С.**, Селезнева Ю.А.; заявитель и владелец Донецк. нац. ун-т экономики и торговли

им. Михаила Туган-Барановского. – № u201302474; заявл. 28.02.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. 18/2013 - 2 с.

16. Пат. 136071 Украина, МПК А23L17/00. Способ производства реструктурированной рыбной колбасы / Гура А.В., Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Декань А.А., **Афенченко Д.С.**, Малич А.А.; заявитель и владелец Гура А.В., Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Декань А.А., **Афенченко Д.С.**, Малич А.А. - № u201800177; заявл. 04.01.2018; опубл. 12.08.2019, Бюл. 15/2019 - 2с.

В работах 1, 3, 5-11 соискателем разработана математическая модель, выполнено математическое моделирование, выполнена интерпретация полученных результатов моделирования

В работе 2 соискателем проведено прогнозирование несущей способности элементов оборудования на предел выносливости В работе 4 соискателем проведен цикл экспериментальных и реологических исследований по влиянию высокого давления на физико-механические характеристики сырья.

В работы 12-13 вошли результаты аналитических исследований температурных неоднородностей в камерах высокого давления.

В работах 14-16 были использованы результаты теоретических исследований процесса обработки пищевых продуктов высоким давлением.

Во всех работах автор принимал участие в подготовке материалов к публикациям.

Подписано в печать 05.09.2022. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Зак. № 09-27.

Отпечатано ФЛП Кириенко С.Г.
Свидетельство о государственной регистрации физического
лица – предпринимателя № 40160 серия АА02 от 05.12.2014 г.
283014, г. Донецк, пр. Дзержинского, 55/105.