

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСШЕГО 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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Севаторов Николай Николаевич
кандидат технических наук, доцент

Донецк – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
СИСТЕМА УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ГРЕЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1. Область применения ОВГД	14
1.2. Реализация процесса ОВГД	21
1.3. Математическое моделирование ОВГД	29
1.4. Выводы по разделу	34
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛО- ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОВГД	35
2.1. Установка для ОВГД и измерения параметров	35
2.2. Тепло-гидродинамические процессы в камере высокого давления	39
2.2.1 Особенности потока воды, образованного выталкивающей силой	39
2.2.2 Уравнения термодинамики при обработке высоким давлением	40
2.2.3 Теплообмен в рабочей камере высокого давления	50
2.2.4 Корректировка температуры воды в камере высокого давления	63
2.3 Выводы по разделу	65
РАЗДЕЛ 3. УСЛОВИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	66
3.1 Определение задачи в программе ANSYS <i>Fluent</i>	68
3.2 Температурная зависимость теплофизических свойств материала	70
3.3 Зависимость теплофизических свойств материала от давления и температуры	72
3.4 Создание файла исходного кода на языке C	73

3.5 Присоединение <i>UDF</i> к ANSYS <i>Fluent Solver</i>	74
3.6 Определение граничных условий	75
3.7 Определение методов решения	75
3.8 Расчет модели	77
3.9 Выводы по разделу	78
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ	79
4.1 Результаты численного моделирования теплообменных процессов	79
4.2 Результаты экспериментов по влиянию различных факторов на характер температурного поля	94
4.3 Влияние термоизолирующей вставки на распределение температуры	106
4.4 Влияние изменения свойств воды	112
4.5 Выводы по разделу	118
ВЫВОДЫ	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	122
ПРИЛОЖЕНИЯ	141

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВД - высокое давление

ВГД - высокое гидростатическое давление

ОВГД - обработка высоким гидростатическим давлением

СИСТЕМА УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A	площадь (м^2)
c_p	удельная теплоемкость ($\text{Дж}/[\text{кг К}]$)
$c_{p_{\text{дов}}}$	удельная теплоемкость воды при $T_{\text{дов}}$ ($\text{Дж}/[\text{кг К}]$)
$c_{p_{\text{кон}}}$	удельная теплоемкость воды при $T_{\text{кон}}$ ($\text{Дж}/[\text{кг К}]$)
$c_{p_{\text{нач}}}$	удельная теплоемкость воды при $T_{\text{нач}}$ ($\text{Дж}/[\text{кг К}]$)
D	диаметр цилиндра (м)
\vec{F}	движущая сила естественной конвекции
Gr_x	число Грасгофа с характерным размером x ($= g\beta\Delta T x^3 / \nu^2$)
Gr_L	число Грасгофа с длиной L в качестве характерного размера
g	ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$)
g_z	ускорение свободного падения в отрицательном направлении z ($\text{м}/\text{с}^2$)
k	теплопроводность ($\text{Вт}/\text{мК}$)
L	длина цилиндра (м)
$m_{\text{дов}}$	масса добавленной воды (кг)
$m_{\text{кон}}$	окончательная масса воды (кг)
$m_{\text{нач}}$	начальная масса воды (кг)
$m_{\text{термопары}}$	масса термопары
P	давление (Па)
Pr	число Прандтля, безразмерное ($= \mu c_p / k$)
Q	характеристика источника тепла ($\text{Вт}/\text{м}^3$)
r	радиальная координата (м)
r_o	радиус отверстия в заглушке для входа воды (м)
Ra_x	число Рэлея, безразмерное ($Gr_x \cdot Pr$)
R_i	внутренний радиус камеры (м)
R_o	внешний радиус камеры (м)
s	удельная энтропия ($\text{Дж}/[\text{кгК}]$)
t	время (с)

$t_{нагнет}$	время нагнетания давления (с)
$t_{выдержж}$	время выдержки давления включительно с $t_{нагнет}$ (с)
$t_{сброс}$	время сброса давления до атмосферного (с)
T	температура (К)
$T_{дов}$	температура добавленной воды (К)
$T_{нагнет}$	температура воды в конце нагнетания давления при $t_{нагнет}$ (К)
T'	температура – показатель термопары во время нагнетания давления (К)
T''	температура – показатель термопары во время выдержки под давлением (К)
T'''	температура – показатель термопары во время сброса давления (К)
$T_{кон}$	конечная температура воды (К)
$T_{слоя}$	температура слоя (К)
$T_{выдержж}$	температура воды в конце выдержки при $t_{выдержж}$ (К)
$T_{нач}$	начальная температура воды (К)
$T'_{нач}$	начальная температура термопары (К)
T_{max}	максимальная температура (К)
$T_{пов}$	температура поверхности (температура стенки) (К)
$T_{воды}$	температура воды, в которую погруженная термопара
T_{∞}	температура жидкости на расстоянии от поверхности объекта или температура окружающей среды (К)
T_{∞}	температура водяной бани (К)
x	характеристическая длина (м)
∇	оператор в осесимметричных цилиндрических координатах
z	осевая координата
V	вектор скорости (м/с)

ГРЕЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ

α	температуропроводность воды $[k / \rho C_p]$ ($\text{м}^2/\text{с}$)
α_s	температуропроводность стали ($\text{м}^2/\text{с}$)
β	коэффициент теплового расширения (К^{-1})
ε_m	импульс турбулентной вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$)
ε_t	турбулентная теплопроводность ($\text{м}^2/\text{с}$)
λ	коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/[\text{м}^2\text{К}]$)
ρ	плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$)
ρ_{oc}	плотность окружающей среды ($\text{кг}/\text{м}^3$)
ρ_0	плотность при T_0 ($\text{кг}/\text{м}^3$)
μ	вязкость (Па с)
φ_v	вязкая диссипация
ν	кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$)
υ	удельный объем ($\text{м}^3/\text{кг}$)
τ	постоянная времени для термопары (с)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Обработка высоким гидростатическим давлением (ОВГД) приобрела исключительную важность во многих областях биотехнологии. В последние годы она стала 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 [1]. 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 [2].

Согласно принципу Паскаля, ВД имеет равномерное и мгновенное действие на всю массу продукта [3]. 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 [4].

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 [5]. Тем не менее, без внимания оставлена возможность физической и термической неоднородности.

Вопросами развития теоретических основ процесса обработки ВГД пищевых продуктов занимались отечественные и зарубежные 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. Жаксалькова, В.А. Сукманов, С.А. Соколов, В.Б. Гаркуша, 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. [6-41].

Многими из этих исследователей отмечался факт температурной неоднородности в камерах ВД различных объемов и конструктивных исполнений (поршневого типа или с инжекционным подводом рабочей среды). Наличие такой неоднородности может приводить к искажению ожидаемых результатов обработки ВГД.

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 вначале 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 [42-45].

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 посвящена разработке математической модели камеры ВД и моделированию процессов температурной и гидравлической неоднородности в камерах заданных геометрических размеров при различных граничных условиях технологического процесса ОВГД.

Связь работы с научными программами, планами. Работа содержит результаты исследований, выполненных автором в плане госбюджетной тематики НИР ГО ВПО «ДонНУЭТ» 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.

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.

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.

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.

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 55 рисунками и содержит 5 таблиц. Список использованной литературы содержит 140 наименований.

РАЗДЕЛ 1.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка высоким гидростатическим давлением – это технология нетермической обработки, применяемая в пищевой промышленности для улучшения качества и безопасности продуктов питания, а также для продления срока годности (сохранности) продуктов. Во время ОВГД продукты (твердые продукты, жидкости, упакованные или без упаковки) могут подвергаться воздействию давлением величиной до 1000 МПа. Несмотря на то, что концепция ОВГД была представлена более чем сто лет назад, ее целесообразность и примеры успешного применения продемонстрированы лишь на протяжении последних десятилетий.

1.1. Область применения ОВГД продуктов питания

В 1899 году Хайт впервые продемонстрировал ОВГД как процесс возможной консервации продуктов питания [46, 47]. Он подтвердил, что обработка высоким давлением при температуре окружающей среды может замедлить скисание молока [48]. Бриджман (в 1914 г.) наблюдал коагуляцию яичного белка во время обработки высоким давлением. Технология не нашла широкого применения в то время из-за недоступности необходимого оборудования, способного работать под высоким давлением [49], но снова появилась в пищевой промышленности в 80-х годах уже как новейшая технология. В период 1982-1988 гг. профессора Фаркас, Гувер и Кнорр в Университете штата Делавер попробовали повторить работу Хайта, используя холодный изостатический пресс, и подтвердили, что давление в 350 МПа может инактивировать широкий спектр патогенных микробов и микроорганизмов, вызывающих порчу продукта [50]. В это самое время в Японии проводились исследования относительно консервирования продуктов питания с помощью

ВД. В 1992 году на рынке Японии появились первые коммерчески выпущенные продукты питания, обработанные высоким давлением (продукты с высоким содержанием кислоты, в том числе яблочные, клубничные и ананасовые джемы) [51]. С тех пор в Японии обработка высоким давлением также применялась к фруктовым консервам, рисовым пирогам, сырым кальмарам, виноградному и мандариновому сокам [49, 52]. Продукты, обработанные высоким давлением, представлены на рынке Японии с 1992 года, а на рынках Европы и США – с 1996 г. [47, 53, 54]. В Соединенных Штатах развитие технологии обработки высоким давлением было обусловлено работой исследовательского центра сухопутных войск США, направленной на улучшение качества сухих пайков для армии. В 1993 году началось исследование консервирования продуктов питания с помощью ВД. Результатом двухлетней работы стало получение консервированных пищевых продуктов, готовых к употреблению, которые показывали микробиологическую стабильность на протяжении 120 дней при комнатной температуре.

Области применения ОВД

В первую очередь, обработка высоким давлением была направлена на консервирование продуктов питания путем уничтожения микроорганизмов с целью продления срока годности продуктов с минимальным влиянием на качество продукта. По результатам исследований был признан потенциал относительно физической модификации структуры продуктов питания, а также возможность разработки новых технологических процессов, таких как замораживание, размораживание, жаренье и обезвоживание и др. под давлением [49]. Давление также может оказывать влияние на пищевые компоненты, например, денатурацию или модификацию белков, активацию и инактивацию ферментов, изменение взаимодействия ферментных субстратов и изменение свойств полимерных углеводов и жиров [55].

Два основных принципа, которые определяют влияние обработки

высоким давлением на продукты питания, является изостатический принцип Паскаля и принцип Ле Шателье. Согласно принципу Паскаля, ВД имеет равномерное и мгновенное действие на всю массу продукта. Физико-химические изменения во время ОВГД происходят по принципу Ле Шателье [56], согласно которому, любая реакция связанная с конформационными изменениями или фазовыми переходами, если эта реакция сопровождается уменьшением объема, то изменения будут ускоряться при высоком давлении, тогда как реакции, которые сопровождаются увеличением объема, будут замедляться [57].

Применение обработки высоким давлением имеет значительный потенциал как альтернатива традиционной термической обработке в условиях мгновенного подвода давления, т.е. время для создания давления не зависит от размера и формы продукта питания (соответственно, больший объем продукта не нуждается в более продолжительной обработке, чем меньший объем). При этом происходит уменьшение времени обработки, сохранение свежести, текстуры, запаха и цвета обрабатываемого продукта. Таким образом, ОВГД является альтернативным способом для изготовления новых, безопасных, высококачественных продуктов с минимальным негативным влиянием, которое связано с термической обработкой [58].

Сохранность и улучшение качества

Химические реакции, сопровождаемые уменьшением объема, ускоряются во время ОВГД. Однако, ВД не влияет на ковалентные связи в продуктах питания [47]. Цвет, питательные вещества и вкус в продуктах, обработанных высоким давлением, сохраняются лучше, чем в продуктах питания после термической обработки. Результаты исследований [59] подтвердили отсутствие значительных изменений в пищевой ценности и антиоксидантной активности томатов и моркови после ОВГД. Результаты исследований [60] доказали, что хлорофилл был стабильным при 75°C и давлении в 600 МПа во время продолжительной обработки (10-40 минут). Оставался стабильным после

обработки ВД витамин С. Результаты исследований [61] доказали, что под действием давления аспартам быстро разлагается на несладкие компоненты в молоке, а в кислотной среде, такой как соки или газированные напитки, разложение на несладкие компоненты не происходило. Также было подтверждено, что во время ОВГД морковного пюре разрушения каротиноидов не происходило. Они были защищены, поскольку были погружены в липофильную среду [61]. Во время исследований, проводимых с апельсиновым соком, дегустационная комиссия не ощутила различия между соком, обработанным высоким давлением, и необработанным соком [62]. Кроме этого, в контрольном образце сока через 2 недели при температуре 6°C были выявлены признаки ферментации, вследствие чего он признан органолептически непригодным, а сок, обработанный высоким давлением, не имел признаков ферментации на протяжении 5 недель.

Модификация структуры продуктов питания

ВД имеет значительный потенциал для модификации структуры продуктов питания и их составных частей, таких как денатурация белков и клейстеризация крахмала [47]. Ферменты – это особая группа белковосодержащих веществ, которые активируются при низком давлении (100-200 МПа), тогда как ВД, обычно инактивирует ферменты [47]. На денатурацию белков с помощью давления влияет $pH \geq 5$, наличие соли, концентрация питательной среды и элементная структура ферментов [46]. Такие параметры обработки, как давление, время и температура, влияют на реструктуризацию белков, которая может привести к образованию высокоценных продуктов [63]. Согласно [64], проводились исследования желатинизации белков сои. Авторами было доказано, что результаты исследований разнятся в зависимости от методики обработки белков (предварительная обработка давлением перед процессом термообработки, только обработка давлением, только термическая обработка). Спектр белков, денатурированных под давлением, имеет больше свойств неизмененного белка,

чем спектр белков, денатурированных с помощью температуры [62]. Водная дисперсия крахмала может становиться желатинообразной при комнатной температуре под действием ВД [65]. Также, было установлено, что желе из кукурузы и картофельного крахмала, полученные под давлением, являются более сильными, чем желе, полученные под действием температур. Объединение термообработки и ВД открывает путь новым текстурам и новым продуктам [65].

Инактивация микроорганизмов

Механизм инактивации микроорганизмов под влиянием давления – это комплексный феномен, который включает денатурацию белков, фазовые изменения, морфологические изменения и мембранный эффект. Исследования, в которых применяется механизм клеточного лизиса, свидетельствуют, что давление влияет на микроорганизмы по-разному. ВД может послужить причиной инактивации в системах переноса через мембрану, которая приводит к сублетальному повреждению, или же может повлиять на деятельность обмена и повредить мембрану клетки [66]. Вакуоли внутриклеточного газа могут разрушаться под действием давления 0,6 МПа [46]. Некоторые микроорганизмы, такие как *Listeria monocytogenes*, показывают больший уровень инактивации во время обработки при низкой температуре и высоком давлении [47]. ВД до 600 МПа может инактивировать растительные клетки и ферменты без тепловой обработки, но не бактериальные споры [52]. Споры являются стойкими к давлению в 800 МПа частично из-за низкого содержания воды в оболочке споры в сравнении с растительными клетками [52]. Однако, обработка высоким давлением может применяться в объединении с термообработкой. Для инактивации спор *Bacillus stearothermophilus* при температуре 90°C в течение 30 минут при давлении 150 МПа, чтобы получить уменьшение на два порядка от оригинального количества 10^6 , и *B. subtilis* при температуре 70°C и давлении 150 МПа [47, 67]. Согласно исследований профессора Кнорра [47] установлено, что продукция метаболита некоторых

микроорганизмов может увеличиваться в условиях ВД, а инаktivация некоторых микроорганизмов не связана со взаимодействием температуры и давления. Это создает уникальную возможность для селективной инаktivации определенных микроорганизмов в смеси.

Инаktivация вируса гепатита А с помощью ОВГД была продемонстрирована в работе [68]. Исследователи доказали уменьшение на 7 порядков после обработки давлением 450 МПа на протяжении 5 минут.

Согласно данным, приведенным в [52], на различных установках для ОВГД время затраченное на повышения давления от давления окружающей среды до 1000 МПа, может составлять 3...4 минуты (180...240 с в зависимости от типа установки), но сброс давления занимает лишь несколько секунд. Внезапный сброс давления оказался временами более эффективным, чем само давление. Быстрый сброс давления или декомпрессия имеет более значительное разрушительное влияние на споры, чем увеличение времени выдержки под высоким давлением.

Технологические процессы под давлением

Замораживание и размораживание

Процесс ОВГД дает возможность разработки новых технологических процессов обработки продуктов питания, таких как замораживание и размораживание под высоким давлением, а также замораживание и размораживание при изменении давления. Обработка под давлением – это обычная замораживание или размораживание, которые происходят под постоянным давлением, тогда как замораживание или размораживание при изменении давления предусматривает резкое снижение давления (сброс давления). Согласно [69 - 74] при давлении 207,5 МПа происходит снижение точки таяния и замерзания воды до -22°C , что приводит к быстрому льдообразованию с формированием малых и однородных кристаллов льда во время снижения давления и вызывает меньше разрушительного влияния на структуру продукта питания в сравнении с традиционным медленным

замораживанием. Было выявлено, что во время замораживания при изменении давления (140 МПа, -14°C) образуются меньшие и более однородные кристаллы льда в сравнении с замораживанием в интенсивном потоке воздуха [75]. Размораживание с помощью давления снижает потерю влагоудерживающих свойств и улучшает сохранность цвета и запаха фруктов [76]. Обработка высоким давлением также позволяет уменьшить время размораживания замороженного мяса на треть, в сравнении с классическим процессом при атмосферном давлении, а также уменьшает влагопотерю мяса [69, 72, 77].

Дегидратация и регидратация

Процесс дегидратации, как осмотическое обезвоживание, является медленным технологическим процессом. Применение ВД вызывает усиление проницаемости клеточной структуры, что способствует усилению массопереноса.

Доказано, что после обработки давлением 600 МПа на протяжении 15 минут, скорость высушивания картофеля значительно возросла [76]. Также наблюдалось улучшенное обезвоживание и получение твердой консистенции во время осмотической дегидратации ананасов [76]. Большинство обезвоженных продуктов необходимо регидрировать перед употреблением. Потеря сухих веществ во время регидратации- основная проблема, связанная с дегидрированными продуктами. Повышенное водопоглощение во время замачивания клейкого риса было обнаружено после обработки давлением до 600 МПа [76].

1.2. Реализация процесса ОВГД

Как уже отмечалось выше, кроме увеличения сроков сохранности (годности) продуктов питания с помощью ОВГД можно получить новые структуры и текстуры, повысить функциональность определенных ингредиентов, создавая возможность разработки новых продуктов питания [76].

Доказано, что ОВГД можно применять для увеличения срока годности

йогурта и размораживания замороженных морепродуктов [52]. ОВД также улучшает сычужную или кислотную коагуляцию сывороточных белков и увеличивает выход сыра [78]. ОВД может увеличить массоперенос и выход сока, а также улучшить технологический процесс сушки [48]. ОВД приводит к улучшению высвобождения метаболитов из растений и уменьшения поглощения жиров картофелем фри [76]. Наблюдалось снижение поглощения жиров на 40% во время жарки, когда термически бланшированный замороженный картофель был заменен картофелем, бланшированным под высоким давлением [76]. В работе [80] авторами было установлено, что извлечение каротиноидов и витамина А из апельсинового сока можно улучшить при условии увеличения давления со 100 до 400 МПа.

Несмотря на то, что исследование проводилось относительно влияния ВД на продукты питания при давлениях до 1000 МПа, конструктивные ограничения оборудования сужают возможности коммерческого применения ВД до 700 МПа.

Процесс обработки высоким давлением

Обработка продуктов питания высоким давлением обычно является периодическим процессом, когда продукты питания, твердые вещества или жидкости подвергаются воздействию давления от 50 до 1000 МПа. В настоящее время в пищевой промышленности представлено оборудование, которые работают под высоким давлением до 800 МПа и температурах в диапазоне от +5 до +90°C со временем экспозиции до 30 минут или более [83]. Существует два типа оборудования, работающего под высоким давлением, которые доступны для применения в пищевой промышленности: традиционные системы периодического действия и полупериодические системы. В системах периодического действия можно обрабатывать как твердые, так и жидкие продукты питания, в полупериодических системах можно обрабатывать лишь жидкие продукты питания, которые имеют низкую вязкость и поддаются перекачиванию. Эффективность применения ВД во время обработки продуктов

питания зависит от содержания воды или масла, а также отсутствия внутренних воздушных карманов. Продукты питания, содержащие включения воздуха, такие как зефир, будут раздавлены под действием ВД, а сухие твердые вещества не содержат достаточно влаги для эффективного разрушения микроорганизмов во время обработки высоким давлением.

На данное время в полупериодических системах используется камера ВД, которая содержит подвижный поршень для сжатия жидких продуктов питания. В США компания Avure Technologies изготавливает полупериодические системы для обработки чистых жидкостей, например соков. Для наполнения камеры ВД используется пищевой насос низкого давления. Когда камера ВД наполнена, входное отверстие закрывается, а за подвижный поршень подается технологическая вода под высоким давлением для сжатия продукта питания. После выдержки давления на протяжении определенного периода времени, давление в системе сбрасывается путем сброса давления технологической жидкости. Жидкость после обработки нагнетается из камеры ВД в стерильный резервуар для хранения. Потом обработанную жидкость можно разливать в предварительно стерилизованные контейнеры в стерильных условиях.

При периодической обработке высоким давлением продукты питания обычно упаковывают под вакуумом в эластичный пакет или контейнер, загружают в камеру ВД, после чего камера заполняется средой передачи давления (водой). В пищевой промышленности вода довольно часто используется как жидкость передачи давления из-за механической безопасности и с точки зрения экономии [81]. Обработка высоким давлением осуществляется в три этапа – этап сжатия (компрессия), когда давление повышается от атмосферного до необходимой величины, как изображено на рис. 1.1. ВД не разрушает продукт питания, потому что давление применяется изостатично, т.е. равномерно во всех направлениях, что обеспечивает равномерное воздействие.

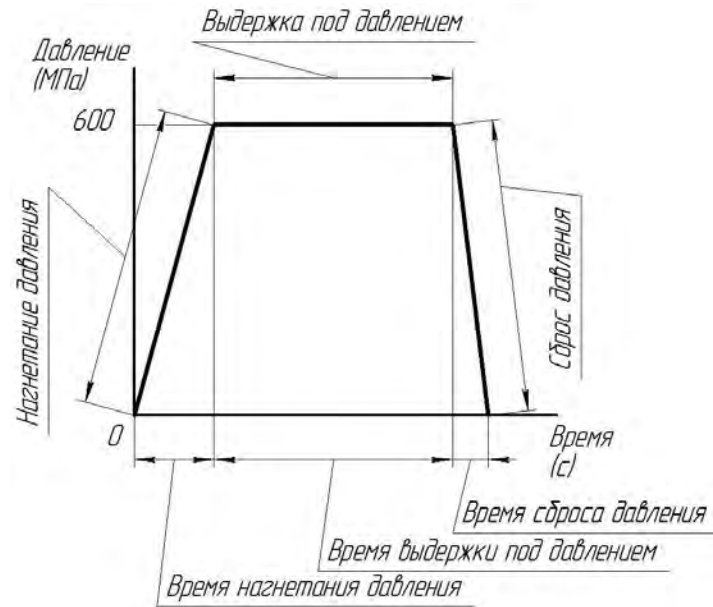


Рисунок 1.1 - Типичное изменение давления в зависимости от времени в процессе ОВД

Во время этапа сжатия, работа сжатия, превращается в теплоту и увеличивает температуру нагнетательной среды. Термическое влияние, связанное с обработкой высоким давлением, более детально будет проанализировано далее. После этапа сжатия происходит этап выдержки под давлением, когда давление поддерживается на стабильном уровне на протяжении заданного периода времени. Давление снижается до давления окружающей среды в этапе сброса давления. После чего продукты извлекаются для дальнейшей обработки или упаковки.

Достичь необходимого ВД в системе можно тремя путями: прямым сжатием, косвенным сжатием и нагревом среды передачи давления. Во время прямого сжатия используется поршень с большой и малой поршневыми камерами. Большая поршневая камера соединена с насосом низкого давления, а маленькая поршневая камера используется для уменьшения объема среды передачи давления путем действия гидравлического давления, которое получено в большой поршневой камере. Косвенное сжатие использует усилитель ВД для перекачивания среды под давлением из резервуара непосредственно в закрытый и деаэрированный резервуар для достижения

заданного давления [82]. В этой системе используется поршень для повышения давления, так же, как и во время прямого сжатия, но изменение положения поршня происходит путем нагнетания в камеру воды с помощью насоса ВД. Третий метод сжатия, который пока что не используется в пищевой промышленности. Суть его заключается в передаче давления внутри камеры ВД, в результате нагрева среды, что вызывает расширение вследствие увеличения температуры [82].

Оборудование для периодической обработки высоким давлением состоит из стальной камеры цилиндрической формы с высокой прочностью на растяжение, двух торцевых уплотнителей (заглушек), средств для ограничения перемещения торцевых уплотнителей (замыкающий хомут для противодействия высокой осевой силе), насосов прямого и/или косвенного давления для создания давления, а также необходимых средств контроля давления и температуры [83]. В качестве стальной камеры цилиндрической формы может быть использован монолитный цилиндр, который имеет определенные преимущества, в частности, простую структуру, высокую точность в расчетах прочности и низкие производственные затраты при изготовлении, но монолитные цилиндры могут использоваться лишь для камер небольшого размера. Монолитные цилиндры ВД не подходят для больших камер из-за уменьшения прочности. При воздействии ВГД на стенку цилиндра возникают значительные усилия, следовательно, требуется еще более толстостенный цилиндр. В монолитных цилиндрах кольцевое напряжение на внешней поверхности стенки ощутимо меньше, чем напряжения на внутренней поверхности, соответственно, материал стенки не используется в полном объеме [84]. Одним из способов, которым можно решить эту проблему, является применение остаточных напряжений, создаваемых многослойными цилиндрами (пригодными для сжатия) и обмоткой высокопрочной проволокой с натяжением на цилиндре. В многослойном цилиндре используются два или более цилиндров с посадкой с натягом. Это приводит к образованию внутри внутреннего цилиндра высоких остаточных напряжений, благодаря способности к сжатию и повышению границы

усталостной прочности, таким образом гарантируя безопасность даже в случае усталостного разрушения внутри цилиндра. Обмотка проволокой по цилиндру также образует сжимающие остаточные напряжения на стенках цилиндра, высокие растягивающие напряжения не возникают, когда бандажированные проволокой цилиндры подвергаются внутреннему давлению, что придает им более высокую прочность [85]. Это также обеспечивает режим отказа «утечка перед разрывом» для камер с большим поперечным сечением и, таким образом, обеспечивает безопасность оператора оборудования.

Теплопередача во время ОВГД

Несмотря на то, что ОВГД считается нетермическим процессом, по законам термодинамики любые вещества, подвергаемые сжатию, подвергаются повышению/снижению температуры во время процесса сжатия/расширения. Большинство продуктов питания, в том числе и вода, не сжимаются при низком давлении, но при высоком давлении они могут сжиматься в значительной мере. Например, вода, которая является полярным веществом, сжимается на 15% при 600 МПа, тогда как гексан (неполярное вещество) сжимается на 25% при 600 МПа [86]. В случае применения ВД к продуктам питания, молекулы продукта сжимаются, то есть их межмолекулярное расстояние уменьшается, а теплота генерируется вследствие работы, выполненной для противодействия межмолекулярным силам. Генерированное таким образом теплота, более известное как тепло адиабатного сжатия, приводит к повышению температуры продукта. Такое повышение температуры является обратимым при сбросе давления, поскольку теплота поглощается. Повышение температуры на 1°C при повышении давления на 100 МПа определяет теплотворную способность вещества при сжатии. Теплотворная способность при сжатии пищевых продуктов во время ОВГД зависит от таких показателей, как технологическое давление, сжимаемость, начальная температура, состав продукта, термодинамические свойства: вязкость, теплопроводность и удельная

теплоемкость [87]. В таблице 1.1 приведены значения теплотворной способности при сжатии для различных продуктов.

Таблица 1.1

Теплотворная способность при адиабатном сжатии некоторых продуктов, полученная из литературных источников [88].

Вещество при температуре 25°C	Изменение температуры при увеличении давления на каждые 100 МПа (°C)
Вода	≈ 3,0
Апельсиновый сок	≈ 3,0
Молоко 2% жирности	≈ 3,0
Томатный соус	≈ 3,0
Лосось	≈ 3,2
Куриный жир	≈ 4,5
Говяжий жир	≈ 6,3
Оливковое масло	От 6,0 до 8,7
Соевое масло	От 6,2 до 9,0
Гексан	≈ 40,0

По данным таблицы 1.1., теплотворная способность продуктов изменяется в диапазоне от 2...40°C. Для воды это значение составляет 2...3°C, тогда как для масла и жиров – 6...9°C что может быть обусловлено их повышенной сжимаемостью, меньшей теплопроводности и меньшей теплоемкости. Теплотворная способность при сжатии липидов (≈20°C) не зависит от длины углеводной цепи, но высокий уровень ненасыщенности углеводной цепи уменьшает теплотворную способность липидов при сжатии (≈14°C) [62]. Для растворителей, таких как гексан, это значение может быть на уровне 40°C. Авторами [87] было установлено, что теплотворная способность воды при сжатии повышается при увеличении начальной температуры, тогда как начальная температура практически не влияет на теплотворную способность масла. В пищевой промышленности вода чаще всего используется

как среда передачи давления, потому что она является безопасной, недорогой, и имеет сравнительно постоянную теплотворную способность.

Кроме того, если жидкость, передающая давление, имеет высокую теплотворную способность при сжатии, как масла, то процессы, проходящие в камере, могут включать непреднамеренные тепловые эффекты [89].

Теплота, генерируемая при адиабатном сжатии нагнетательной среды, приводит к разнице температур между образцом продукта, нагнетательной средой и стенками камеры, и непрерывно рассеивается по металлическим стенкам камеры в результате теплопроводности. Это происходит во время нагнетания давления, а также во время выдержки под давлением, когда не происходит генерации теплоты. Таким образом, после сброса давления температура падает ниже начальной температуры, как показано на рис. 1.2.

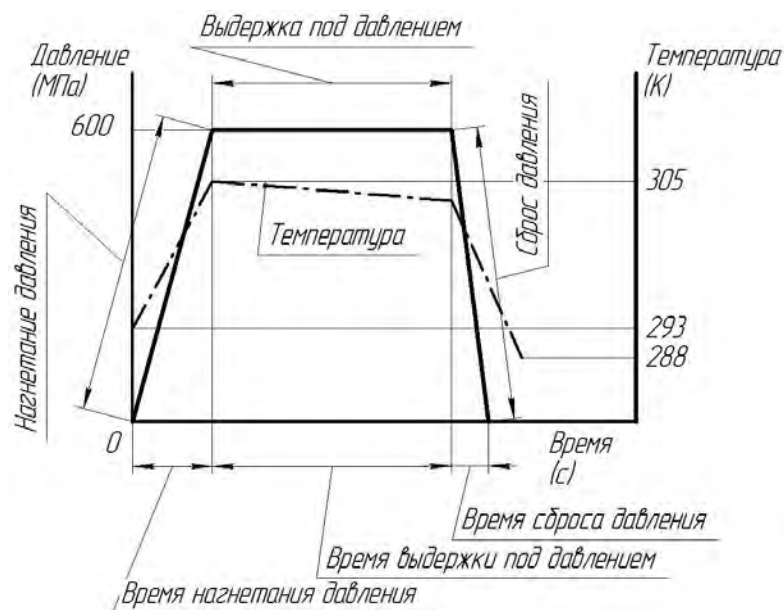


Рисунок 1.2 - Типичное изменение давления и температуры в зависимости от времени в процессе ОВГД

Потеря теплоты на стенках приводит к неоднородному распределению температуры в жидкости, при этом жидкость в центре камеры более теплая, чем жидкость возле стенки. Также происходит естественная конвекция близ стенок камеры, которая влияет на распределение температуры. По наблюдениям

Т. Макиты было установлено [81], что температура передающей давление среды возле стенок камеры быстро снижалась из-за высокой теплопроводности металла, из которого изготовлена камера; среда ВД в центре камеры достигала максимальной температуры, которая была практически равна сумме начальной температуры среды и увеличению температуры из-за нагрева при сжатии. Кроме этого, во время косвенной подачи давления, в камеру ВД необходимо нагнетать дополнительную жидкость с помощью внешнего источника, который может иметь температуру, отличную от имеющейся температуры жидкости в камере, что также, в конце концов, будет влиять на распределение температуры.

В случае применения обработки высоким давлением к микроорганизмам, которые могут быть инактивированы вследствие применения лишь ВД, распределение температуры в камере не является важным. Таким образом, при низких начальных температурах, то есть при комнатной температуре, неоднородность температуры во время обработки не представляет собой угрозу безопасности продукта. Однако споры бактерий могут выжить в условиях давления выше 1000 МПа при комнатной температуре [67]. Но в случае обработки с объединением температуры и давления, необходимым может быть лишь среднее давление (≈ 600 МПа) и средняя температура ($> 70^\circ\text{C}$) [90]. В таком случае неоднородное распределение температуры во время обработки может привести к неоднородной инактивации спор, которые не подвержены воздействию ВД, но чувствительны к обработке в условиях сопряжения ВД и высокой температуры.

Таким образом, имеется необходимость исследования распределения температуры, установленной в камере из-за сопряженной (теплопроводности и конвекции) теплопередачи, для разработки стратегий управления процессом, чтобы достичь высокой степени однородности процесса.

Поскольку пищевые продукты подвергаются минимальному разрушению питательных веществ при температурах ниже 100°C (373,15 К), ОВГД можно применять при умеренных температурах к ряду пищевых продуктов, особенно загрязненных спорами, которые обычно подвергаются термической стерилизации при температуре около 121°C (394,15 К). Согласно

исследованиям [90] было установлено, что адиабатический нагрев вследствие сжатия жидкости под высоким давлением может вызвать значительное изменение распределения температуры по всему обрабатываемому продукту. Учитывая неоднородность распределения температуры во время обработки, можно утверждать, что цель обработки может быть не достигнута в любом месте объема продукта питания [92].

1.3. Математическое моделирование ОВД

Исследования по математическому моделированию облегчают понимание теплопередачи системы, но они должны быть подтверждены экспериментальными данными [94]. Некоторые ученые делали попытки моделирования гидродинамических и тепловых изменений во время ОВД [66, 95 - 99]. Для предлагаемых числовых моделей эти исследователи придерживались детерминированного подхода, который основан на основных уравнениях для обработки высоким давлением. Среди трудностей, связанных с моделированием теплопередачи при обработке ВД, является недостаток сведений о соответствующих термофизических свойствах разных продуктов питания под давлением.

В работах [94, 96] впервые были изучены динамические изменения конвекции жидкости и теплопередачи во время обработки ВД. Для исследований применялась оптическая камера ВД с объемом 2 мл. Были разработаны методы термографии и измерение скорости по цифровым изображениям частиц под ВД, что позволило установить временные рамки для гидродинамической и тепловой компенсации жидкостей под действием ВД до 800 МПа [66]. Эти экспериментальные исследования были подтверждены численными исследованиями в работах [95, 100].

Согласно работе [101], было исследовано влияние конвекции при теплопередаче под влиянием ВД на инактивацию ферментов с использованием математического метода на основе метода конечных объемов. Исследовалось влияние геометрической формы камеры и средней вязкости на тепловую

неоднородность во время обработки ВД. В предложенной математической модели использовалась вязкость как функция температуры и давления. Было установлено, что в большей камере увеличивается скорость инактивации из-за повышения средней температуры, что вызвано меньшими теплопотерями на стенках [101-103].

В работе [103] изучалось влияние конвекционной и диффузной передачи теплоты на инактивацию *Escherichia coli* в упакованных продуктах (молоке) под действием ВД. В исследованиях применялся численный метод на основе метода конечных объемов, а в математическую модель было введено уравнение теплопроводности для упаковки. В модели также была учтена плотность, теплоемкость и вязкость воды (среды) в качестве функции температуры и давления. Было установлено, что неоднородность более чем на один логарифмический цикл наблюдается в зависимости от параметров материала упаковки, от положения и порядка упаковок в камере. Для упакованных жидких продуктов с низкой теплопроводностью упаковки, смоделированная естественная конвекция может вызвать неоднородность в зависимости от вязкости упакованного продукта. При отсутствии такой тепловой неоднородности, инактивация будет более сильной, и для камер большего размера можно будет сократить время обработки.

В работе [105] численно смоделированы механические эффекты сжатия дрожжевой клетки под действием ВГД давления с помощью метода конечных элементов. Было установлено, что деформация клетки под давлением значительно отклоняется от изотропного уменьшения объема.

В работах [69, 93] была смоделирована кондуктивная теплопередача во время ОВГД с применением математического метода конечных разностей. Была рассмотрена общая модель коэффициента теплопередачи для учета теплопередачи между нагнетательной средой и стенками камеры. Зависимая от давления теплопроводность и коэффициент теплового расширения продукта были экспериментально установлены и введены в числовую модель. Численно было доказано, что при циклическом изменении давления, 8 циклов по 30 с сжатия и 2 минуты выдержки в условиях давления 500 МПа, достигается

ускоренная инактивация α -амилазы *Bacillus subtilis* в сравнении с одноразовым применением того же самого давления и того же самого общего времени обработки. Это может быть связано с увеличением температуры во время сжатия. Также было установлено, что максимальная температура, которая достигается во время циклической обработки, была ниже, чем при одноразовом подъеме давления. С другой стороны, повышенная температурная гетерогенность наблюдалась во время циклической обработки [93]. В работах [94, 100, 101] было установлено, что продукты питания с большей вязкостью показывают большую тепловую гетерогенность. 50% раствор сахарозы показал в 6 раз больший перепад температур, в сравнении с водой при одинаковых условиях.

Таким образом, для разработки стратегии управления процессом ОВГД, необходимо, чтобы вязкость продуктов питания под давлением была известным параметром. Также необходимо исследовать термодинамические процессы в жидкостях.

Трудности экспериментального характера

В процессе ОВГД необходим постоянный контроль распределения полей температур по объему камеры, однако существует ряд трудностей, связанных с недостатком технологий для измерения и визуализации температуры, давления и скорости движения жидкости в камере во время применения ВГД. Это создает ограничения относительно четкого подтверждения результатов математического моделирования. На данное время для подтверждения распределения температур в конкретных точках в камере используются термопары, установленные внутри камеры ВД, а для измерения линейного давления используется датчик давления. С помощью камеры ВД объемом 2 мл [96] было продемонстрировано, что можно использовать термохромные жидкие кристаллы для визуализации температуры под ВД. Однако существует потребность в более глубоком экспериментальном исследовании для разработки методов, которые будут содействовать визуализации температуры, давления и скорости в камерах коммерчески больших размеров во время обработки ВД.

Гипотезы, применяемые при исследовании

Выполненная работа по сжатию жидкости во время нагнетания давления приводит к увеличению внутренней энергии системы, которая служит причиной роста температуры. Рост температуры, а также потери теплоты на стенках камеры приводят к изменению плотности жидкости, а выталкивающая сила может вызвать образование потока жидкости. Индуцированный поток вместе с теплопотерями на стенку камеры может привести к неоднородному распределению температуры внутри жидкости. Добавление воды в камеру во время нагнетания давления для компенсации сжатия также влияет на распределение скорости поля потока и распределение температуры потока.

В идеальных условиях термопара должна четко реагировать на колебания измеряемых температур, независимо от скорости их изменения, но на практике такое происходит редко [106]. Когда термопара фиксирует резкое изменение температуры, ей необходимо некоторое время для реакции. Если время реакции большее в сравнении со скоростью изменения измеряемой температуры, то она не сможет обеспечить точное и оперативное реагирование на изменение температуры.

Исходя из выше сказанного, сформулированы следующие допущения, принятые в процессе математического моделирования:

1. Распределение температуры внутри камеры ОВГД становится неоднородным во время обработки, и эта неоднородность температуры возникает вследствие адиабатного нагревания при сжатии и сопутствующей потерей теплоты на стенках камеры.

2. Изменение отношения площади криволинейной поверхности (площади образующей внутреннего цилиндра камеры ВД) к объему камеры ВД приведет к существенному изменению распределения температур в объеме камеры.

3. Установка термоизоляционной вставки уменьшает неоднородность температуры.

Для разработки математической модели камеры ВД необходимо решить следующие задачи:

- численное моделирование распределения полей температур внутри камер заданных геометрических размеров для обработки продуктов питания высоким давлением при различных граничных условиях;
- изучение температурной неоднородности, возникающей в нагнетательной среде (воде);
- сравнение результатов математического моделирования с данными, представленными в литературных источниках;
- исследование влияния геометрических размеров камеры на распределение полей температур в нагнетательной среде;
- математическое моделирование распределения полей температур в нагнетательной среде при введении в математическую модель теплоизоляционной вставки.

1.4 Выводы по разделу

В результате выполненного аналитического обзора литературных источников установили:

1. Чтобы достичь высокой степени однородности процесса, необходимо исследовать распределение температуры, установленной в камере из-за сопряженной (теплопроводности и конвекции) теплопередачи.

2. Для разработки стратегии управления процессом ОВГД на основании математических моделей необходимо, чтобы вязкость продуктов питания под давлением была известным параметром. Наряду с этим, необходимо исследовать термодинамические процессы в жидкостях.

РАЗДЕЛ 2.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛО- ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОВГД

2.1. Установка для ОВГД и измерение параметров

Экспериментальные данные распределения температур в камере ВД получены из работ [107, 108]. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Общий вид технологической установки для ОВГД

Установка собрана на комплектующих компании Elmhurst, Inc. и имеет следующие технологические параметры:

объем камеры – 10 литров;

максимальное рабочее давление – 690 МПа;

время выхода на максимальное давление – 180 сек;

диапазон рабочих температур – 5°C до +90°;

время экспозиции давления – до 60 мин.

Камера высокого давления

Технологическая установка для ОВГД состоит из цилиндра, выполненного из нержавеющей стали. Общая длина цилиндра составляет 1090 мм, внешний диаметр – 445 мм. Напорная камера в цилиндре имеет диаметр 142 мм и длину 823 мм, окруженная толстой стенкой из нержавеющей стали (рис. 2.2).

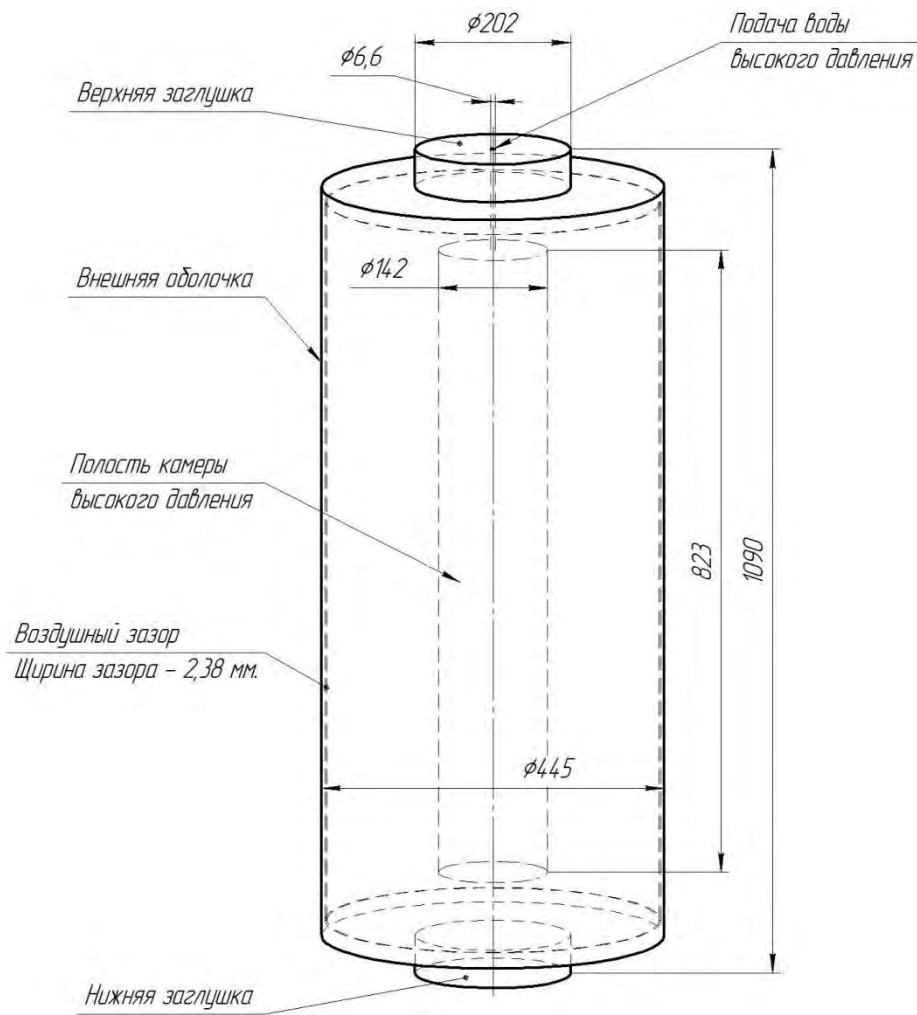


Рисунок 2.2 - Схематическое (условное) изображение технологической камеры ВД с указанием габаритных размеров

Камера имеет внешнюю оболочку с воздушным зазором в 2,38 мм между стальной стенкой и оболочкой. Согласно [107, 108], подача воды во время нагнетания

давления обеспечивалась через верхнюю заглушку. Частью верхней заглушки также были стальные трубки, которые установлены в напорной камере (рис. 2.3).

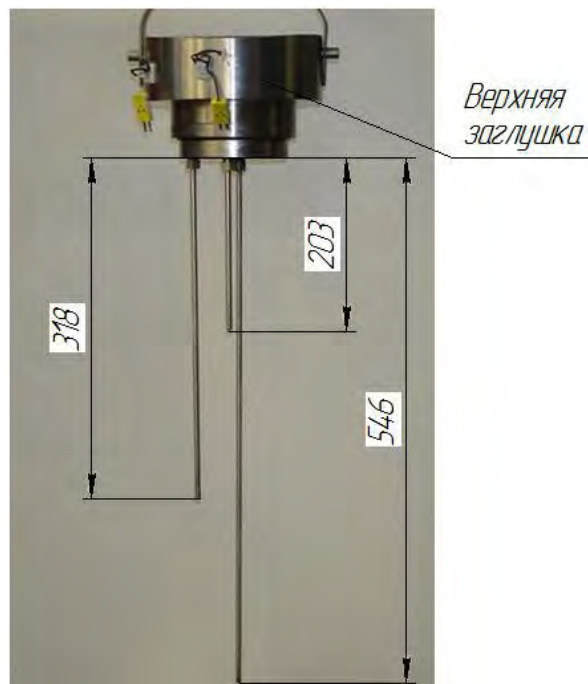


Рисунок 2.3 - Расположение и глубина погружения термопар ВД для измерения постоянной времени для каждой термопары [108]

Измерение давления

Давление в системе во время обработки измерялось с помощью датчика давления, который измерял давление в нагнетательной магистрали. Автором [108] было сделано допущение, что это и есть показатель давления, которое на данное время создано в камере ВД. Данные давления как функция времени записывались с частотой 4 Гц на протяжении всего периода нагнетания давления, выдержки давления и сброса давления с помощью системы сбора данных.

Измерение температуры

Камера ВД оборудована тремя термопарами, которые были вкручены в

верхнее торцевое уплотнение. Эти термопары обеспечивают измерение температуры воды в камере во время обработки ВД. Зонды – термопары типа К (Ni-Cr/Ni-Al) (незаземленные) в трубке ВД (внутренний диаметр трубки 2,1 мм) [109-113]. Диапазон температур для термопар типа К составляет от -200°C до 1200°C . Очень часто термопары типа К используют в камерах ВД, потому что их калибровка нечувствительна к давлению. Наконечники термопар были расположены на трех разных глубинах (203 мм, 318 мм и 546 мм от верхнего края напорной камеры) и на расстоянии 10 мм от стенки (см. рис. 2.3). Данные температуры как функция времени для всех трех термопар записывались при частоте 4 Гц на протяжении всего периода нагнетания давления, выдержки под давлением и сброса давления с помощью системы сбора данных.

Подсчет постоянной времени термопар

Динамический отклик термопары ВД является конструктивной особенностью термопары. Задержка в реакции вызвана наличием трубки ВД вокруг термопары.

Реакция термопары на пошаговые изменения температуры представлена формулой

$$\frac{[T_{\infty} - T]}{[T_{\infty} - T_{нач}]} = e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}, \quad (2.1)$$

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

Постоянную времени τ определяли экспериментально. Для этого каждую термопару погружали в стабильную водяную баню (при температуре таяния льда, с кипения воды и с фиксированной температурой в 50°C (323,15 К)),

данные температуры и времени записывались с помощью устройства. Каждый эксперимент имел трехкратное повторение. Значение постоянной времени для каждой термопары получены с помощью составления натурального логарифма левостороннего члена уравнения (2.1) в качестве функции времени с аппроксимацией прямой линией. Тангенс угла наклона наилучшей эмпирической кривой и является постоянной времени τ . Выполнен статистический анализ для оценки важности влияния длины трубки термопары ВД и температуры теплоносителя на значение постоянной времени.

2.2. Тепло- гидродинамические процессы в камере высокого давления

2.2.1 Особенности потока воды, образованного выталкивающей силой

Для разработки соответствующей математической модели и выполнения численного моделирования, необходимо знать, что полученный при естественной конвекции поток в камере ВД является ламинарным или турбулентным. 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 [114], если

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}, \quad (2.2)$$

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 [115]:

$$Gr_L = \frac{L^3 g \beta (T_{нов} - T_\infty)}{\nu^2}, \quad (2.3)$$

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.

Предположим, что уравнение (2.2) можно применять к потоку на внутренней поверхности, и выяснили, что в нашем случае оно имеет смысл. Согласно работе [115], для плоской поверхности в вертикальном положении переход потока в турбулентный происходит приблизительно при $Gr = 10^9$. В нашем случае это значение составляло порядка 10^9 при комнатной температуре и 10^{11} при повышенной начальной температуре. Для математической модели и численного моделирования было принято, что поток является турбулентным.

2.2.2 Уравнения термодинамики при обработке высоким давлением

Сохранение массы

Уравнение непрерывности – это общий баланс массы, который выполняется во всех задачах без чистого образования массы и без массопереноса [116].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0, \quad (2.4)$$

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

Поскольку плотность жидкости (воды) принимается за константу, уравнение непрерывности для жидкости упрощается к виду:

$$\nabla \cdot (\bar{V}) = 0 \quad (2.5)$$

Сохранение импульса

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

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = \bar{F} + (\nu + \varepsilon_m) \nabla^2 \bar{V} - \frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (2.6)$$

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 $g(\rho_{oc} - \rho)$ [117], 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. В работе [118] авторы утверждали, что в приближении Буссинеска изменения в плотности жидкости игнорируются, кроме случаев, когда они содействуют возникновению гравитационной силы, таким образом, член силы представлен в уравнении (2.7). Это приближение является верным, пока изменения плотности являются незначительными

$$g(\rho_{oc} - \rho) \cong -\rho\beta(T - T_{\partial\omega}). \quad (2.7)$$

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

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\partial\bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla\bar{V} = \underbrace{\hat{g}_z \beta (\bar{T} - T_{нач})}_{\text{только в направлении } z} + (\nu + \varepsilon_m) \nabla^2 \bar{V} - \frac{1}{\rho} \nabla \bar{P}, \quad (2.8)$$

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:

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla\bar{T} = \nabla \cdot (\alpha + \varepsilon_t) \nabla T + \frac{Q}{\rho c_p} + \beta \bar{T} \frac{D\bar{P}}{Dt} + \frac{\mu}{\rho c_p} \varphi_v, \quad (2.9)$$

где α – теплопроводность, ε_t – турбулентное теплопроводное рассеивание, Q – член уравнения, который отвечает 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 (2.9) 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

$$\beta\bar{T} \frac{D\bar{P}}{Dt} = \beta\bar{T} \left[\frac{\partial\bar{P}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla\bar{P} \right] = \quad (2.10)$$

$$= \beta\bar{T} \left[\frac{\partial\bar{P}}{\partial t} + \bar{V}_x \frac{\partial\bar{P}}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial\bar{P}}{\partial y} + \bar{V}_z \frac{\partial\bar{P}}{\partial z} \right]. \quad (2.11)$$

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

$$\beta\bar{T} \frac{D\bar{P}}{DT} = \beta\bar{T} \frac{\partial\bar{P}}{\partial t}. \quad (2.12)$$

Четвертым членом с правой стороны уравнения (2.9), что представляет вязкое рассеивание, мы пренебрегаем им из-за низкого градиента скорости и низкой вязкости воды. Поэтому основное уравнение для сохранности энергии в турбулентном потоке выглядит таким образом:

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla\bar{T} = \nabla \cdot (\alpha + \varepsilon_i) \nabla\bar{T} + \beta\bar{T} \frac{\partial\bar{P}}{\partial t}. \quad (2.13)$$

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

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T. \quad (2.14)$$

Термодинамика обработки высоким давлением

Адиабатное повышение температуры

Как уже отмечалось ранее, 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. Повышение температуры можно оценить по уравнению термодинамики, которое происходит из полной производной энтропии системы под давлением

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP, \quad (2.15)$$

где s – удельная энтропия.

При предположении относительно обратного процесса, изменение энтропии будет равно нулю -

$$\therefore \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP = 0. \quad (2.16)$$

Из тождественности Максвелла известно, что

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P. \quad (2.17)$$

Подставив уравнение (2.17) в уравнение (2.16), мы получим

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP = 0. \quad (2.18)$$

Согласно данным работы [119] известно, что изобарная теплоемкость определяется как

$$c_p = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p T, \quad (2.19)$$

и коэффициент теплового расширения определяется как

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \quad (2.20)$$

Подставив уравнения (2.19) и (2.20) в уравнение (2.18), мы получим

$$\frac{c_p}{T} dT - \beta v dP = 0. \quad (2.21)$$

После преобразования уравнения (2.21) мы получим

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T v \beta}{c_p}, \quad (2.22)$$

где v – это удельный объем.

Из уравнения (2.22) очевидно, что dT/dP зависит от физических величин, которые являются функцией состава образца, а эти физические свойства также зависят от температуры и давления [81]. 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).

Теоретические значения теплотворной способности воды при сжатии

Значения теплотворной способности воды при сжатии при разных начальных температурах, рассчитанная по (2.22), представлены в таблице 2.1. Значение β , ρ и c_p для воды при разных начальных температурах были взяты из работы [115].

Таблица 2.1

Теоретически посчитанные значения теплотворной способности воды при адиабатном сжатии при разных начальных температурах

T ($^{\circ}\text{C}$)	T (K)	β (K^{-1})	ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$)	c_p (Дж/кг K)	dT/dP ($^{\circ}\text{C}/100$ МПа)
10	283,15	0,000095	997,1	4195	0,64
20	293,15	0,00021	998,2	4182	1,47
25	298,15	0,00028	997,1	4180	2,00
30	303,15	0,0003	995,7	4176	2,18
40	313,15	0,00039	992,2	4175	2,95
60	333,15	0,00053	983,2	4181	4,29

Основным ограничением во время теоретических подсчетов повышения температуры под давлением является удельный объем под давлением, который не является константой при таких условиях [87]. Наблюдалось расхождение между теоретическими значениями и значениями, найденными в литературе.

Значения теплотворной способности при сжатии воды, приведенные в литературе

Значение теплотворной способности воды можно встретить в различных литературных источниках. Авторы работы [120] утверждали, что для воды при начальной температуре 25°C повышение температуры составляет 2°C на 100 МПа, тогда как авторы работы [121] подтвердили, что это значение составляет 3°C на 100 МПа. Они также определили значение теплотворной способности при сжатии воды при $60^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$ на 100 МПа.

Значение теплотворной способности при сжатии, которые подсчитаны на основе данных рис. 2.4 (Кафедра пищевых биотехнологий и технологий производства продуктов питания, Технический университет, Берлин) приведенные в таблице 2.2.

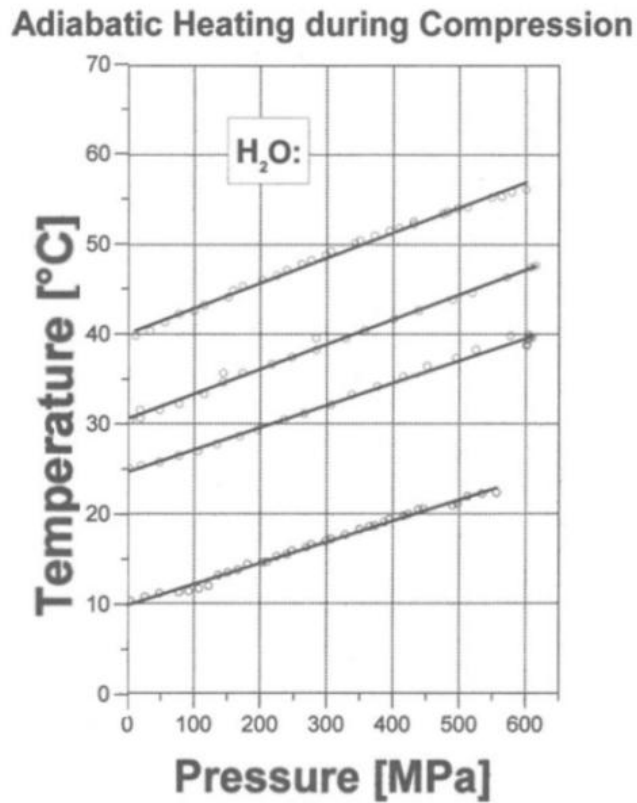


Рисунок 2.4 - Значение теплотворной способности при адиабатном сжатии воды, полученные на кафедре пищевых биотехнологий и технологий производства продуктов питания, Технический университет, Берлин

Таблица 2.2

Значение теплотворной способности при адиабатном сжатии воды с рис. 2.4.

T (°C)	T (K)	dT/dP (°C /100 МПа)
10	283,15	2,32
20	298,15	2,5
30	303,15	2,8
40	313,15	2,8

Значение теплообразующей способности воды dT/dP при разных начальных температурах также можно найти в стандартной базе справочных данных NIST-IAPSW, версия 10, раздел 2.2, что представлена в работе [122]. Эти данные приведены в таблице 2.3, откуда также видно, что значение dT/dP является также функцией давления.

Таблица 2.3

Значение теплотворной способности при адиабатном сжатии воды, полученные из стандартной базы справочных данных NIST-IAPSW

Температура (°C)	Температура (К)	dT/dP (°C/100 МПа)					
		0,1- 100 МПа	100- 200 МПа	200- 300 МПа	300- 400 МПа	400- 500 МПа	500- 600 МПа
20	293,15	1,5	2,5	2,8	3	3,15	3,15
30	303,15	2,2	2,8	3,15	3,3	3,3	3,3
40	313,15	2,8	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4
60	333,15	4,25	4,1	4	3,8	3,8	3,8
80	353,15	5,6	5,2	4,8	4,6	4,4	4,2

То есть в литературе из разных источников можно найти расходящиеся значения dT/dP . Для данного исследования использовались значения теплотворной способности, полученные из стандартной базы справочных данных NIST-IAPSW, поскольку они учитывают влияние начальной температуры и повышения давления на значения теплотворной способности.

Работа силы давления или генерация тепла

Член уравнения (2.13), который характеризует работу сил давления, был изменен ради учета повышения температуры во время нагнетания. Из уравнения (2.13):

$$\text{Работа давления} = \beta T \frac{dP}{dt}. \quad (2.23)$$

После преобразования уравнения (2.23) получим

$$\beta T = \frac{c_p}{\nu} \frac{dT}{dP}. \quad (2.24)$$

Подставив значение βT из уравнения (2.24) в уравнение (2.23), получим

$$\text{Работа давления} = \frac{c_p}{\nu} \frac{dT}{dP} \frac{dP}{dt}, \quad (2.25)$$

$$\therefore \text{Работа давления} = \rho c_p \frac{dT}{dP} \frac{dP}{dt}, \quad (2.26)$$

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

Значение плотности и теплоемкости было взято из работы [123] при начальной температуре воды. Были использованы значения dT/dP воды при разных начальных температурах, как приведено в таблице 2.3.

Расчётные данные для определения скорости рабочей среды закачиваемой в камеру высокого давления

В установке ВД вода закачивается в камеру через верхнюю заглушку с помощью насоса ВД. Скорость, с которой жидкость под давлением входит в камеру ВД во время нагнетания давления, может быть рассчитана на основе скорости повышения давления, сжимаемости воды и диаметра входного отверстия следующим образом:

$$v_{\text{выход}} = \frac{C \cdot V_{\text{воды}}}{\pi \cdot r_o^2 \cdot t_{\text{нагнет}}}, \quad (2.27)$$

где C - доля сжатия воды (0,15 для 700 МПа), $V_{\text{воды}}$ - объем воды в емкости (в м³), r_o - радиус отверстия в заглушке для входа воды (в м), $t_{\text{нагнет}}$ - время повышения давления (180 с для 600 МПа).

На основании уравнения (2.27) было установлено, что значение $v_{\text{выход}}$ составляет 0,28 м/с. Было сделано допущение, что вода поступает в камеру ВД с постоянной скоростью. Значения скорости задавались в качестве граничного условия на входе воды в модели численного моделирования для периода нагнетания давления.

2.2.3 Теплообмен в рабочей камере высокого давления

Чтобы установить, будет ли возникать поток в воздушном зазоре между основной камерой и оболочкой, нам необходимо подсчитать число Рэлея. Число Рэлея – это безразмерная величина, которая определена как произведение числа Грасгофа и числа Прандтля. Для свободной/естественной конвекции близ вертикальной стенки число Рэлея подсчитывается таким образом:

$$Ra_x = Gr_x \cdot Pr = \frac{x^3 g \beta}{\nu^2} (T_{\text{нов}} - T_{\infty}) \cdot Pr, \quad (2.28)$$

где Ra_x – число Рэлея, Gr_x – число Грасгофа, Pr – число Прандтля, x – характеристическая длина.

Вышеприведенные свойства жидкости, которые необходимы для подсчета Gr_x и Pr , оценивались при температуре слоя, который определяется как

$$T_{\text{слоя}} = \frac{T_{\text{нов}} + T_{\infty}}{2} \quad (2.29)$$

В работе [124] авторы утверждают, что для вертикальных прямоугольных емкостей теплопередача превышает ту, что происходит вследствие лишь проводимости для $Ra < 1000$, если значение L/d является большим, где L – длина, а d – ширина прямоугольной емкости.

Оценивались свойства жидкости из работы [115] при $T_{\text{слоя}} = 288,15$ К. Толщина воздушного зазора задавалась характеристической длиной. Допускалось, что различие температур между воздушной поверхностью и оболочкой составляло 1 К. Полученное значение Ra_x составляет 1,41. Даже если мы предположим, что различие температур представляет порядка 100 К, результат будет оставаться неизменным, потому что число Релея будет меньше 1000, поэтому в воздушном зазоре будет доминировать теплопередача проводимостью. В численном моделировании воздух рассматривался как непрерывный континуум.

Определение реакции термопары на линейный входной сигнал [125-127]

Динамическая реакция термопары на линейный входной сигнал (линейный рост температуры со временем) можно смоделировать как систему первого порядка. Упрощенный анализ теплопередачи использовался для получения отклика термопары на входное изменение температуры. Уравнение энергии нестационарного состояния (сосредоточенное) для термопары, подверженной теплообмену, имеет вид

$$m_{\text{термопары}} c_P \frac{dT}{dt} = \lambda A (T_{\text{воды}}(t) - T), \quad (2.30)$$

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

На рис. 2.5 схематично показана реакция термопары на переменный входной сигнал.

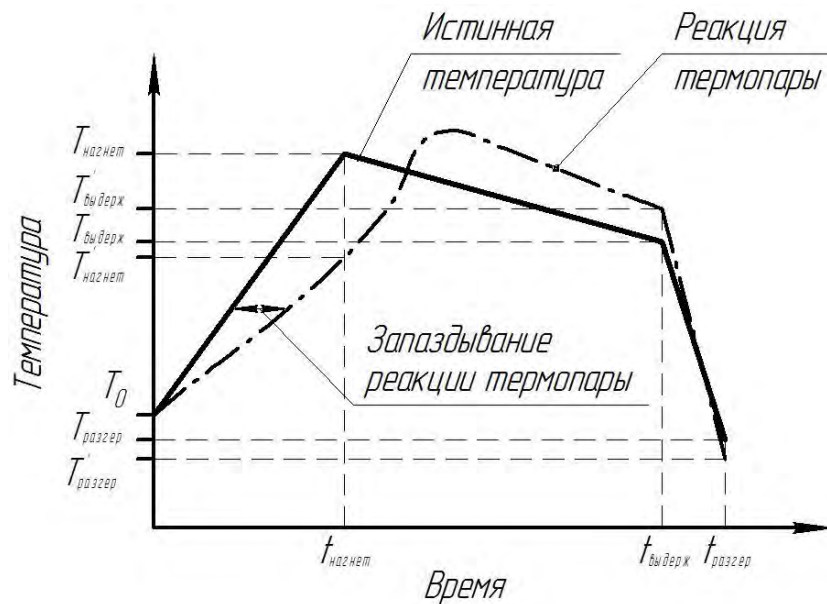


Рисунок 2.5 - Ожидаемая реакция термопары на линейный входной сигнал во время подачи давления, выдержки под давлением и сброса давления

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

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

Взяв линейное повышение температуры воды из рис. 2.5, мы можем изменить уравнение

$$\frac{(T_{\text{воды}} - T_0)}{(T_{\text{нагнет}} - T_0)} = \frac{(t - 0)}{(t_{\text{нагнет}} - 0)}, \quad (2.31)$$

$$T_{\text{воды}} = T_0 + \frac{(T_{\text{нагнет}} - T_0)}{t_{\text{нагнет}}} t. \quad (2.32)$$

Определив T' как температуру, зафиксированную термопарой во время нагнетания давления, мы получим

$$mc_p \frac{dT'}{dt} = \lambda A \left[\left(T_0 + \frac{(T_{\text{нагнет}} - T_0)}{t_{\text{нагнет}}} t \right) - T' \right], \quad (2.33)$$

$$mc_p \frac{dT'}{dt} = \lambda AT_0 + hA \frac{(T_{\text{нагнет}} - T_0)}{t_{\text{нагнет}}} t - \lambda AT'. \quad (2.34)$$

Разделив обе части уравнения (2.34) на mc_p , мы получим

$$\frac{dT'}{dt} + \frac{\lambda A}{mc_p} (T' - T_0) = \frac{\lambda A}{mc_p} \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} t \right). \quad (2.35)$$

Обозначим $(T' - T_0) = \theta'$ (2.36)

$$\therefore \frac{dT'}{dt} = \frac{d\theta'}{dt} \quad (2.37)$$

Используя уравнение (2.37), уравнение (2.35) будет иметь вид

$$\frac{d\theta'}{dt} + \frac{\lambda A}{mc_p} \theta' = \frac{\lambda A}{mc_p} \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} t \right). \quad (2.38)$$

Уравнение (2.38) принимает форму линейного уравнения Лейбница [128], т.е.

$$\frac{dx}{dy} + Py = S(x)$$

Определим интегрируемый множитель таким образом $= e^{\int \frac{\lambda A}{mc_p} dt} = e^{\left(\frac{\lambda A}{mc_p} \right) t} = e^{\frac{t}{\tau}}$

где $\frac{mc_p}{\lambda A} = \tau =$ постоянная времени термопары (2.39)

$$\therefore \theta' e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \int e^{\frac{t}{\tau}} t dt, \quad (2.40)$$

$$\therefore \theta' e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \left[t \int e^{\frac{t}{\tau}} t dt - \int \left(\frac{dt}{dt} \int e^{\frac{t}{\tau}} dt \right) dt \right] \quad (2.41)$$

$$\therefore \theta' e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \left[\tau e^{\frac{t}{\tau}} - \tau^2 e^{\frac{t}{\tau}} \right] + c \quad (2.42)$$

$$\therefore \theta' e^{\frac{t}{\tau}} = \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \left[t e^{\frac{t}{\tau}} - \tau e^{\frac{t}{\tau}} \right] + c, \quad (2.43)$$

$$\therefore \theta' = \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) [t - \tau] + c e^{-t/\tau}. \quad (2.44)$$

Заменив $\theta' = (T' - T_0)$ в уравнении (2.44), мы получим

$$T' - T_0 = \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) [t - \tau] + c e^{-t/\tau}, \quad (2.45)$$

$$\therefore T' = T_0 + \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) [t - \tau] + c e^{-t/\tau}. \quad (2.46)$$

Если $t=0$; $T' = T_0$, мы получим

$$T_0 = T_0 + \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) [0 - \tau] + c e^{\frac{0}{\tau}}, \quad (2.47)$$

$$\therefore c = \tau \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_0}{t_{\text{нагнет}}} \right) \quad (2.48)$$

Заменяв выражение на «с» в уравнении (2.45), мы получим

$$T' = T_o + \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_o}{t_{\text{нагнет}}} \right) [t - \tau] + \left[\tau \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_o}{t_{\text{нагнет}}} \right) e^{-t/\tau} \right], \quad (2.49)$$

$$\therefore T' = T_o + \tau \left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_o}{t_{\text{нагнет}}} \right) \left[\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau} \right]. \quad (2.50)$$

Т.е. реакция термопары на линейный входной сигнал или линейное повышение температуры во время нагнетания давления, представлена уравнением (2.50).

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

Предполагая, что давление со временем снижается линейно при выдержке под давлением, как изображено на рис. 2.5, мы можем составить такое уравнение

$$\frac{(T_{\text{воды}} - T_{\text{нагнет}})}{(T_{\text{выдержк}} - T_{\text{нагнет}})} = \frac{(t - t_{\text{нагнет}})}{(t_{\text{выдержк}} - t_{\text{нагнет}})}. \quad (2.51)$$

\therefore Температура воды $T_{\text{воды}}$ меняется со временем t следующим образом

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдержк}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдержк}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}}] \quad (2.52)$$

Определяя T'' как температуру, которая зафиксирована термопарой во время этапа выдержки под давлением, мы можем считать, что

$$mc_p \frac{dT''}{dt} = \lambda A \left[\left(\frac{T_{\text{выдержк}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдержк}} - t_{\text{нагнет}}} \right) (t - t_{\text{нагнет}}) + T_{\text{нагнет}} - T'' \right]. \quad (2.53)$$

$$\text{Пусть } t - t_{\text{нагнет}} = t'' \quad (2.54)$$

$$\therefore dt = dt'' \quad (2.55)$$

$$mc_p \frac{dT''}{dt''} = \lambda A \left[\left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) t'' + T_{\text{нагнет}} - T'' \right]. \quad (2.56)$$

Разделив обе части уравнения (2.56) на mc_p , мы получим

$$\frac{dT''}{dt''} + \frac{\lambda A}{mc_p} (T'' - T_{\text{нагнет}}) = \frac{\lambda A}{mc_p} \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) t'' \quad (2.57)$$

$$\text{Пусть } T'' - T_{\text{нагнет}} = \theta'' \quad (2.58)$$

$$\therefore \frac{dT''}{dt''} = \frac{d\theta''}{dt''}. \quad (2.59)$$

Подставив выражение из уравнения (2.59) в уравнение (2.57), мы получим

$$\frac{d\theta''}{dt''} + \frac{\lambda A}{mc_p} \theta'' = \frac{\lambda A}{mc_p} \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) t'' \quad (2.60)$$

Соблюдая метод, описанный выше для решения линейного уравнения

Лейбница и используя интегрируемый множитель $= e^{\int \frac{\lambda A}{mc_p} dt''} = e^{\left(\frac{\lambda A}{mc_p} \right) t''} = e^{\frac{t''}{\tau}}$,

мы получим

$$\theta'' e^{\frac{t''}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \int e^{\frac{t''}{\tau}} dt'', \quad (2.61)$$

$$\theta'' e^{\frac{t''}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \left[t'' \int e^{\frac{t''}{\tau}} dt'' - \int \left(\frac{dt''}{dt''} \int e^{\frac{t''}{\tau}} dt'' \right) dt'' \right] \quad (2.62)$$

$$\theta'' e^{\frac{t''}{\tau}} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \left[t'' e^{\frac{t''}{\tau}} - \tau^2 e^{\frac{t''}{\tau}} \right] + c \quad (2.63)$$

$$\theta'' e^{\frac{t''}{\tau}} = \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \left[t'' e^{\frac{t''}{\tau}} - \tau e^{\frac{t''}{\tau}} \right] + c \quad (2.64)$$

$$\theta'' = \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t'' - \tau] + c e^{-t''/\tau} \quad (2.65)$$

Заменяя $\theta'' = (T'' - T_{\text{нагнет}})$ в уравнении (2.65), мы получим

$$T'' - T_{\text{нагнет}} = \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t'' - \tau] + c e^{-t''/\tau} \quad (2.66)$$

$$T'' = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t'' - \tau] + c e^{-t''/\tau} \quad (2.67)$$

При $t = t_{\text{нагнет}}$; $T'' = T'_{\text{нагнет}}$

\therefore тогда $t'' = 0$; $T'' = T'_{\text{нагнет}}$

$$T'_{\text{нагнет}} = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [0 - \tau] + c e^{-0/\tau},$$

$$c = T'_{\text{нагнет}} - T_{\text{нагнет}} + \tau \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \quad (2.68)$$

Заменяя в уравнении (2.67) выражение «с», мы получим

$$T'' = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t'' - \tau] + \left[T'_{\text{нагнет}} - T_{\text{нагнет}} + \tau \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \right] e^{-t''/\tau}. \quad (2.69)$$

$$\text{Заменяем } t'' = t - t_{\text{нагнет}} \quad (2.70)$$

$$T'' = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}} - \tau] + \left[T'_{\text{нагнет}} - T_{\text{нагнет}} + \tau \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \right] e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau}. \quad (2.71)$$

Таким образом, реакция термопары во время выдержки под давлением определяется уравнением (2.71), где $T'_{\text{нагнет}}$ – температура, которая зафиксирована термопарой в конце нагнетания давления.

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

Предполагая, что температура линейно уменьшается во время сброса давления, как показано на рис. 2.5, мы можем составить следующее уравнение

$$\frac{(T_{\text{воды}} - T_{\text{выдерж}})}{(T_{\text{сброс}} - T_{\text{выдерж}})} = \frac{(t - t_{\text{выдерж}})}{(t_{\text{сброс}} - t_{\text{выдерж}})} \quad (2.72)$$

Тогда температура воды $T_{\text{воды}}$ уменьшается во время сброса давления следующим образом

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{выдерж}} + \left(\frac{T_{\text{сброс}} - T_{\text{выдерж}}}{t_{\text{сброс}} - t_{\text{выдерж}}} \right) [t - t_{\text{выдерж}}] \quad (2.73)$$

Определяя T''' как температуру, считываемую термопарой во время фазы сброса давления, из уравнения (2.30) мы можем написать

$$m c_p \frac{dT'''}{dt} = \lambda A \left[\left(\frac{T_{\text{сброс}} - T_{\text{выдерж}}}{t_{\text{сброс}} - t_{\text{выдерж}}} \right) (t - t_{\text{выдерж}}) + T_{\text{выдерж}} - T''' \right] \quad (2.74)$$

Следуя шагам, выполненным для нагнетания давления и выдержки под давлением, для сброса давления мы получаем

$$T''' = T_{\text{выдерж}} + \left(\frac{T_{\text{сброс}} - T_{\text{выдерж}}}{t_{\text{сброс}} - t_{\text{выдерж}}} \right) [t - t_{\text{выдерж}} - \tau] + \left[T''_{\text{выдерж}} - T_{\text{выдерж}} + \tau \left(\frac{T_{\text{сброс}} - T_{\text{выдерж}}}{t_{\text{сброс}} - t_{\text{выдерж}}} \right) \right] e^{-\frac{(t - t_{\text{выдерж}})}{\tau}} \quad (2.75)$$

Таким образом, реакция термопары во время сброса давления определяется уравнением (2.75), где $T''_{\text{выдерж}}$ - это температура, считываемая термопарой в конце периода выдержки под давлением, полученная из уравнения (2.70) при t , равном $t_{\text{выдерж}}$.

Уравнения (2.50), (2.71) и (2.75) 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 ($T_{\text{воды}}$) во времени из экспериментально записанных данных (T' , T'' , и T''' от t). Следовательно, уравнения (2.50), (2.71) и (2.75), полученные выше, были математически преобразованы для получения истинного изменения температуры из температурных данных, записанных термопарой, как описано ниже.

Обратный анализ для определения действительного изменения температуры воды как функции времени

Имея исходные значения T' , T'' , и T''' по фактическим данным исследований [107, 108], мы можем подсчитать «истинное» изменение температуры воды как функцию времени, преобразовав уравнения (2.50), (2.71) и (2.75).

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

Из уравнения (2.50) видно, что компонента уравнения $\left(\frac{T_{\text{нагнет}} - T_o}{t_{\text{нагнет}}}\right)$ является константой во всех точках во время нагнетания давления, мы можем заменить ее как $\left(\frac{T_{\text{воды}} - T_o}{t}\right)$, где $T_{\text{воды}}$ – действительная температура что отвечает T' при времени t .

Откуда получаем

$$\therefore T_{\text{воды}} - T_o = \frac{(T' - T_o)t}{\tau \left[\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau} \right]}, \quad (2.76)$$

$$\therefore T_{\text{воды}} = T_o + \frac{(T' - T_o)t}{\tau \left[\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau} \right]}. \quad (2.77)$$

Уравнение (2.77) используется для прогнозирования скорректированного «истинного» изменения температуры воды со временем t во время нагнетания давления на основе измеренного изменения T' .

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

Из уравнения (2.71) нам известно, что

$$T'' = T_{\text{нагнет}} + \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}} - \tau] + \left[T'_{\text{нагнет}} - T_{\text{нагнет}} + \tau \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) \right] e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau}, \quad (2.78)$$

$$T'' - T_{\text{нагнет}} - T'_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} + T_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} = \left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}} + \tau e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - \tau]. \quad (2.79)$$

Компонента уравнения выше $\left(\frac{T_{\text{выдерж}} - T_{\text{нагнет}}}{t_{\text{выдерж}} - t_{\text{нагнет}}} \right)$ считается константой для

всех точек во время выдержки под давлением, мы можем заменить ее как

$\left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{нагнет}}}{t - t_{\text{нагнет}}} \right)$, где $T_{\text{воды}}$ – действительная температура что отвечает T'' при

времени t .

$$T'' - T_{\text{нагнет}} - T'_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} + T_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} = \left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{нагнет}}}{t - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}} + \tau e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - \tau], \quad (2.80)$$

$$T'' + T_{\text{нагнет}} \left(e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - 1 \right) - T'_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} = \left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{нагнет}}}{t - t_{\text{нагнет}}} \right) [t - t_{\text{нагнет}} + \tau e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - \tau], \quad (2.81)$$

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{нагнет}} + (t - t_{\text{нагнет}}) \left[\frac{T'' + T_{\text{нагнет}} \left(e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - 1 \right) - T'_{\text{нагнет}} e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau}}{t - t_{\text{нагнет}} + \tau e^{-(t-t_{\text{нагнет}})/\tau} - \tau} \right]. \quad (2.82)$$

Уравнение (2.82) использовалось для прогнозирования скорректированного или «истинного» изменения температуры воды во время выдержки под давлением на основе измеренного изменения T'' .

Для $t_{\text{выдерж}} \leq t \leq t_{\text{сброс}}$ [вовремя сброса давления]

Из уравнения (2.75) нам известно, что

$$\begin{aligned}
T''' = & T_{\text{выдержж}} + \left(\frac{T_{\text{сборос}} - T_{\text{выдержж}}}{t_{\text{сборос}} - t_{\text{выдержж}}} \right) [t - t_{\text{выдержж}} - \tau] + \\
& + \left[T_{\text{выдержж}}'' - T_{\text{выдержж}} + \tau \left(\frac{T_{\text{сборос}} - T_{\text{выдержж}}}{t_{\text{сборос}} - t_{\text{выдержж}}} \right) \right] e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}},
\end{aligned} \tag{2.83}$$

$$\begin{aligned}
& T''' - T_{\text{выдержж}} - T_{\text{выдержж}}'' \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} + T_{\text{выдержж}} \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} = \\
& = \left(\frac{T_{\text{сборос}} - T_{\text{выдержж}}}{t_{\text{сборос}} - t_{\text{выдержж}}} \right) \cdot [t - t_{\text{выдержж}} - \tau]
\end{aligned} \tag{2.84}$$

Компонента уравнения выше $\left(\frac{T_{\text{сборос}} - T_{\text{выдержж}}}{t_{\text{сборос}} - t_{\text{выдержж}}} \right)$ считается константой для всех

точек во время выдержки под давлением, мы можем заменить ее как

$\left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{выдержж}}}{t - t_{\text{выдержж}}} \right)$, где $T_{\text{воды}}$ – действительная температура что отвечает T''' при

времени t .

$$\begin{aligned}
& T''' - T_{\text{выдержж}} - T_{\text{выдержж}}'' \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} + T_{\text{выдержж}} \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} = \\
& = \left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{выдержж}}}{t - t_{\text{выдержж}}} \right) \cdot [t - t_{\text{выдержж}} - \tau \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} - \tau],
\end{aligned} \tag{2.85}$$

$$\begin{aligned}
& T''' + T_{\text{выдержж}} \cdot \left(e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} - 1 \right) - T_{\text{выдержж}}'' \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} = \\
& = \left(\frac{T_{\text{воды}} - T_{\text{выдержж}}}{t - t_{\text{выдержж}}} \right) \cdot [t - t_{\text{выдержж}} + \tau \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} - \tau].
\end{aligned} \tag{2.86}$$

$$T_{\text{воды}} = T_{\text{выдержж}} + (t - t_{\text{выдержж}}) \left[\frac{T''' + T_{\text{выдержж}} \cdot \left(e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} - 1 \right) - T_{\text{выдержж}}'' \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}}}{t - t_{\text{выдержж}} + \tau \cdot e^{-\frac{(t - t_{\text{выдержж}})}{\tau}} - \tau} \right] \tag{2.87}$$

Уравнение (2.87) 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 (2.77), (2.82) и (2.87), соответственно, на основе изменения температур T' , T'' , и T''' со временем t .

2.2.4 Корректировка температуры воды в камере высокого давления

Вода нагнетается в камеру во время подачи давления, для компенсации уменьшения объема сжатой воды в камере. Добавленная вода обычно имеет комнатную температуру, которая может влиять на распределение температуры в камере, когда температура воды внутри камеры отличается от температуры воды закачиваемой насосом. Чтобы оценить влияние добавления воды сверху камеры на изменение температуры воды в камере, выполнен простой баланс энтальпий, и поправка была внесена к численному прогнозированию значений температуры. Баланс энтальпий воды в камере выглядит так

$$m_{нач}c_{P_{нач}}T_{нач} + m_{дов}c_{P_{дов}}T_{дов} = m_{кон}c_{P_{кон}}T_{кон}, \quad (2.88)$$

где T – начальная температура воды, $m_{нач}$ – начальная масса воды в камере, $c_{P_{нач}}$ – удельная теплоемкость воды при $T_{нач}$, $T_{дов}$ – температура добавленной воды, $m_{дов}$ – масса добавленной воды, $c_{P_{дов}}$ – удельная теплоемкость воды при $T_{дов}$, $T_{кон}$ – конечная температура воды, $m_{кон}$ – конечная масса воды, а $c_{P_{кон}}$ – удельная теплоемкость воды при $T_{кон}$.

Считаем, что c_p при $T_{нач}$, $T_{дов}$, и $T_{кон}$ – константы (если изменение температуры незначительное), мы получим

$$m_{нач}T_{нач} + m_{дов}T_{дов} = m_{кон}T_{кон}, \quad (2.89)$$

$$\therefore T_{\text{кон}} = \frac{m_{\text{нач}} T_{\text{нач}} + m_{\text{дв}} T_{\text{дв}}}{(m_{\text{нач}} + m_{\text{дв}})}, \quad (2.90)$$

$$\therefore T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}} = T_{\text{нач}} - \frac{m_{\text{нач}} T_{\text{нач}} + m_{\text{дв}} T_{\text{дв}}}{(m_{\text{нач}} + m_{\text{дв}})}. \quad (2.91)$$

После преобразования уравнения (2.91) мы получаем

$$T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}} = T_{\text{нач}} - \frac{m_{\text{нач}} T_{\text{нач}} + m_{\text{дв}} T_{\text{нач}} - m_{\text{нач}} T_{\text{нач}} - m_{\text{дв}} T_{\text{дв}}}{m_{\text{нач}} + m_{\text{дв}}}, \quad (2.92)$$

$$(T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}) = \frac{m_{\text{дв}} (T_{\text{нач}} - T_{\text{дв}})}{m_{\text{нач}} + m_{\text{дв}}}. \quad (2.93)$$

Обычно для воды при 600 МПа $\frac{m_{\text{дв}}}{m_{\text{нач}}} \approx 0,15$

$$\therefore \frac{m_{\text{дв}}}{m_{\text{нач}} + m_{\text{дв}}} \approx \frac{1}{0,15 + 1} = \frac{1}{1,15}, \quad (2.94)$$

$$\therefore T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}} \approx \frac{1}{1,15} (T_{\text{нач}} - T_{\text{дв}}) \quad (2.95)$$

при давлении в 586 МПа.

Используя уравнение (2.95), поправка $(T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}})$ в численном прогнозировании температуры воды при 40°C установлена на уровне 2°C, а при 60°C – 5°C.

2.3 Выводы по разделу

1. Экспериментально получено значение постоянной времени τ для каждой термопары. Принято, что отрицательная обратная величина наклона наилучшей эмпирической кривой и является постоянной времени τ . Выполнен статистический анализ для оценки важности влияния длины трубки термопары ВД и температуры теплоносителя на значение постоянной времени.

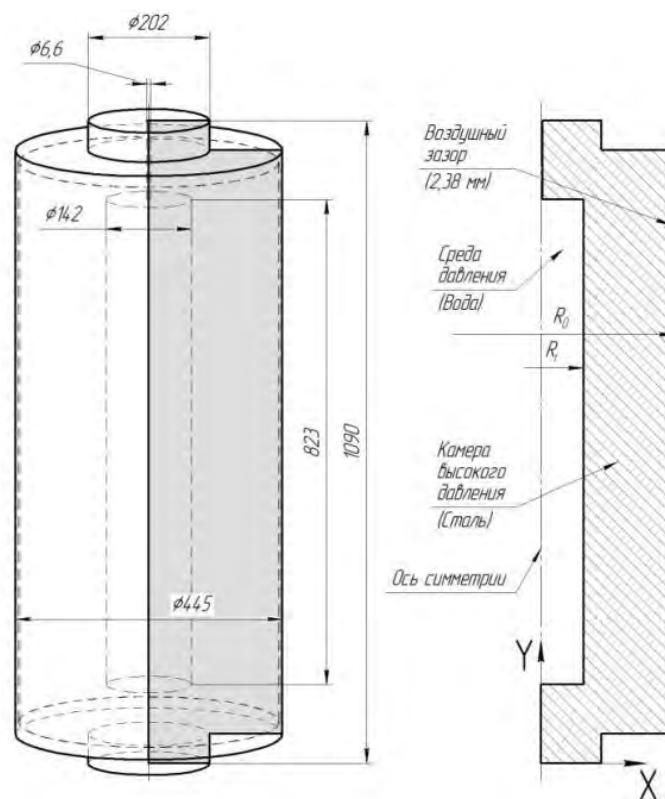
2. Истинное изменение температуры воды в местах расположения термопар во время нагнетания давления, выдержки под давлением и сброса давления может быть спрогнозировано уравнениями (2.77), (2.82) и (2.87), соответственно, на основе изменения температур T' , T'' , и T''' со временем t .

3. Использована модель упрощенного баланса энтальпий для учета влияния добавления воды в камеру. Поправка $(T_{нач} - T_{кон})$ в численном прогнозировании температуры при 40°C установлена на уровне 2°C, а при 60°C – 5°C. Такая поправка служит для согласования между численно спрогнозированными данными и данными экспериментов, особенно при повышенных начальных температурах.

РАЗДЕЛ 3.

УСЛОВИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование теплообмена и потока жидкости проводилось для установки ВД (вода в напорной камере и ограждающие конструкции камеры), которая использовалась во время экспериментальных исследований с помощью коммерческой программы для вычислительной гидродинамики на основе метода конечных элементов *ANSYS Fluent* (версия 19.5) [129]. Основные уравнения сохранения массы, импульса и энергии, описанные в подразделе 2.2, были численно решены для расчетной области, показанной на рис. 3.1, для прогнозирования полей скоростей и температур в среде с повышенным давлением (вода) и уравнения энергии (проводимости) (2.14) решенного для стенки камеры.



а)

б)

Рисунок 3.1 - (а) - Размеры камеры для ОВГД. Затемненный участок обозначает радиальную область для математического моделирования, (б) – Расчетная область для моделирования, $R_i = 71$ мм, $R_o = 223$ мм

Камера ВД из-за своей осевой симметрии была смоделирована как осесимметричный в двух плоскостях цилиндр, а численное моделирование выполнялось в радиальном срезе цилиндра. Более детально о радиальной геометрии см. рис. 3.1 (б). Геометрическая ось осесимметричной геометрии определялась как осевая граница.

Для использования программы математического моделирования ANSYS Fluent с целью решения основных уравнений, вычислительная область была дискретизирована на малые конечные элементы. Дискретная область, которая называется расчетной сеткой, была создана с помощью встроенного генератора сеток ANSYS Mesh. Вычислительная область была дискретизирована с помощью структурной однородной сетки с четырехугольными гранями (рис. 3.2).

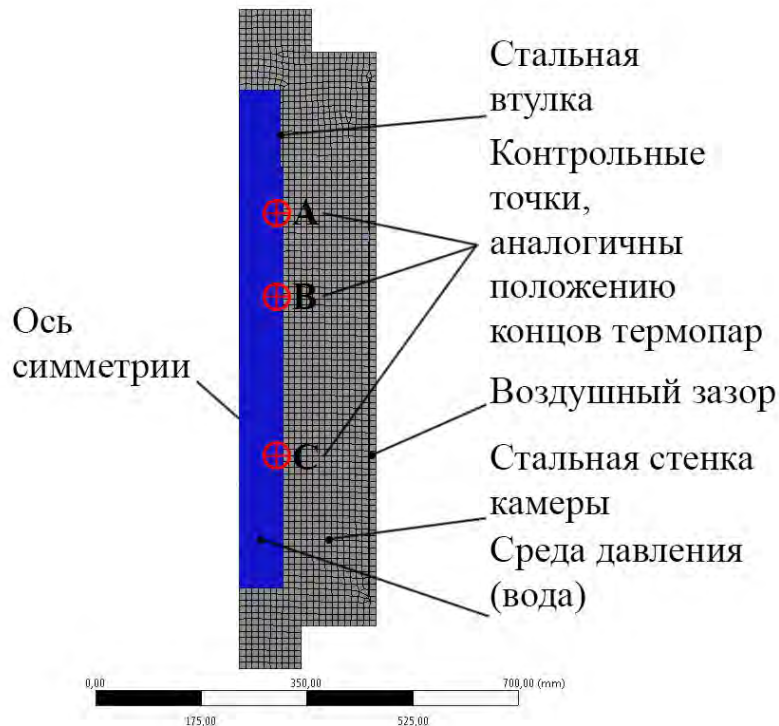


Рисунок 3.2 -Расчетная сетка примененная при математическом моделировании

Для оценки эффекта термоизоляционной вставки в камере ВД геометрия камеры была изменена. Для камеры с изоляцией первоначально было проведено численное моделирование с изоляцией толщиной 3,175 мм, 6,75 мм и 12 мм, однако большинство моделирований проводились с изоляцией толщиной 12 мм, поскольку она давала максимальный эффект изоляции без

значительного изменения рабочего объема. Геометрия с термоизоляцией 12 мм имела 4300 узлов в начале и 47 115 узлов после адаптации. Термоизоляционной вставке были присвоены свойства полимера ПТФЭ (коммерческое название *Teflon*, DuPontTM). Изоляция считалась твердой, т.е. решалось уравнение теплопроводности. Нагрев при адиабатическом сжатии ПТФЭ составлял $\sim 4^\circ\text{C}/100\text{ МПа}$ при 90°C [69...71], не был включен в численную модель в данном моделировании, поскольку доля термоизоляционной вставки по отношению к объему камеры была незначимой.

С целью сравнения экспериментальных данных и численно спрогнозированных данных, на вычислительной области было обозначено три точки именно в таком положении, как и во время проведения эксперимента [107, 108], которые соответствуют положению термодинамических точек в радиальном и вертикальных направлениях, что также представлено на рис. 3.2.

3.1 Определение задачи в программе ANSYS Fluent

Расчетная сетка, сгенерированная с помощью *ANSYS Mesh*, была импортирована в программу *ANSYS Fluent*. Сетка была проверена на предмет размеров области, статистики объема и статистики по фронтальному срезу. Поскольку размеры геометрического элемента сетки заданы в миллиметрах, шкала сетки была использована для превращения ее в единицы системы СИ (метры), как необходимо для программы *ANSYS Fluent*. Для математического моделирования теплового и скоростного полей был использован предусмотренный в программе алгоритм решения неустойчивого уравнения, как указано на рис. 3.3. Поскольку мы имели дело с проблемой теплопередачи, вводилось уравнение энергии.

Следующим шагом было определение физических свойств стали, воды и воздуха.

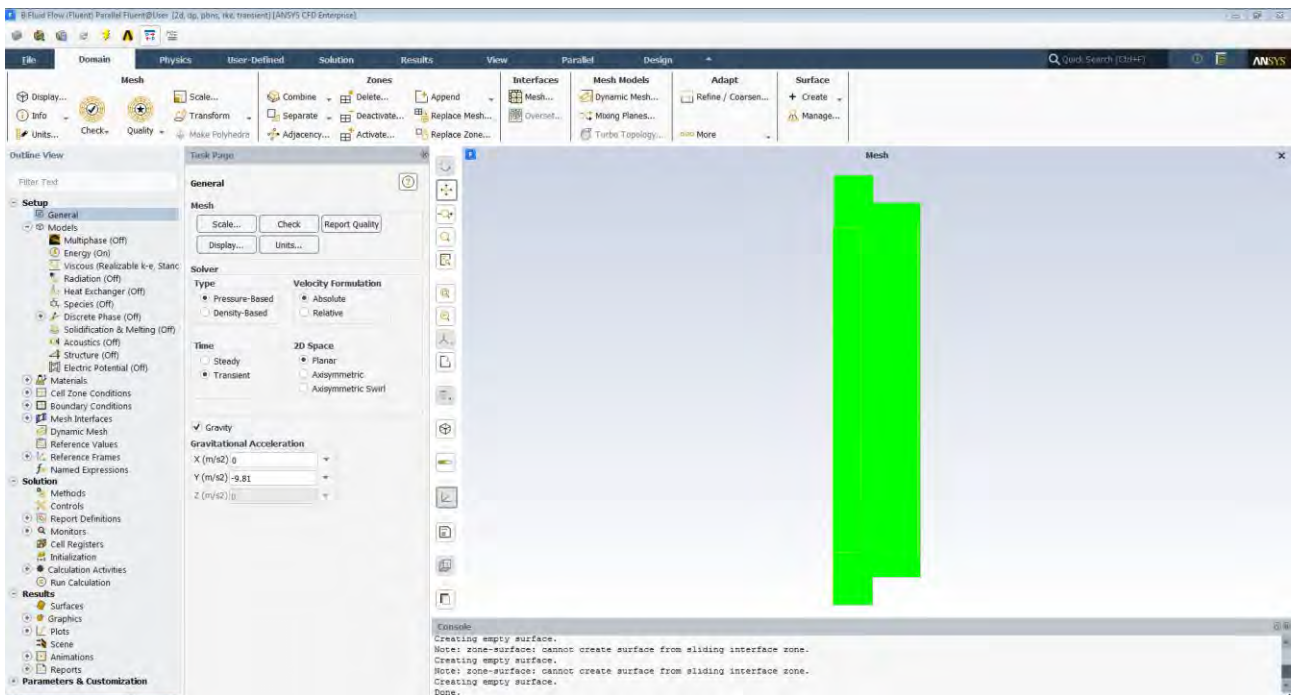


Рисунок 3.3 - Окно настройки решателя *Ansys Fluent*

Данное исследование проводилось на основании предположения, что никаких значительных изменений в плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, вязкости и коэффициенте теплового расширения воды не будет происходить под действием давления. Эти соображения могут быть использованы в будущих исследованиях. Ведь физические свойства стали, воздуха и воды при разных начальных температурах были известны как входные данные для программы математического моделирования. Данные относительно свойств были заимствованы из работы [65].

Поток с естественной конвекцией в воде был смоделирован с помощью использования приближения Буссинеска. Поэтому плотность воды полагалась постоянной величиной для всех уравнений, которые решались, кроме члена выталкивающей силы в уравнении импульса (более детально см. подраздел 2.2.2).

Соответственно, были определены граничные условия для области. Осевые граничные условия определялись на геометрической оси осесимметричного геометрического элемента. Сопряженные тепловые граничные условия определялись между водным столбом и стальной камерой, то есть обе непрерывные области (твердая сталь и вода в качестве жидкости)

были объединены общим ребром. Также для модели изоляции были определены граничные условия между водой и термоизоляцией, термоизоляцией и твердой стальной поверхностью. Относительно внешней поверхности камеры, было использовано граничное условие тепловой конвекции для стенок с коэффициентом теплоотдачи в $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ на вертикальной боковой и нижней стенке, и $5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ – для верхней стенки. Значения коэффициента теплопроводности на внешней поверхности были подсчитаны с помощью отношений, приведенных в работе [57], однако было установлено, что результаты были нечувствительны к малым изменениям в значении коэффициента теплопроводности.

Одной из задач математического моделирования было установление того, является ли поток турбулентным или ламинарным. Внутренняя поверхность цилиндра была приближена к вертикальной плоской пластине с целью выбора модели потока – ламинарного или турбулентного, детальнее по этому вопросу – см. подраздел 2.1. Поскольку было установлено, что режим турбулентный, в численной модели турбулентность была введена с помощью стандартной модели $k-\varepsilon$ [117] для описания турбулентности.

3.2 Температурная зависимость теплофизических свойств материала

Эта часть исследования проводилась исходя из предположения, что никаких значительных изменений плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, вязкости и коэффициента теплового расширения воды под давлением не происходило [136 - 140]. Уравнения для изменения этих свойств при заданной температуре (по 100 градусной шкале) были получены из работы [115] и представлены следующим образом:

$$\rho(\text{кг/м}^3) = 997,18 + (3,14 \cdot 10^{-3})T - (3,75 \cdot 10^{-3})T^2 \quad (3.1)$$

$$c_p(\text{кДж}/[\text{кг} \cdot \text{К}]) = 4,1762 - (9,08 \cdot 10^{-5})T + (5,47 \cdot 10^{-6})T^2 \quad (3.2)$$

$$k(\text{Вт}/[\text{м} \cdot \text{К}]) = 0,571 + (1,7608 \cdot 10^{-3})T + (6,7 \cdot 10^{-6})T^2 \quad (3.2)$$

Панель полиномиального профиля для определения свойств материала в ANSYS *Fluent* (рис. 3.4) использовалась для определения температурной зависимости плотности, теплоемкости и теплопроводности воды.

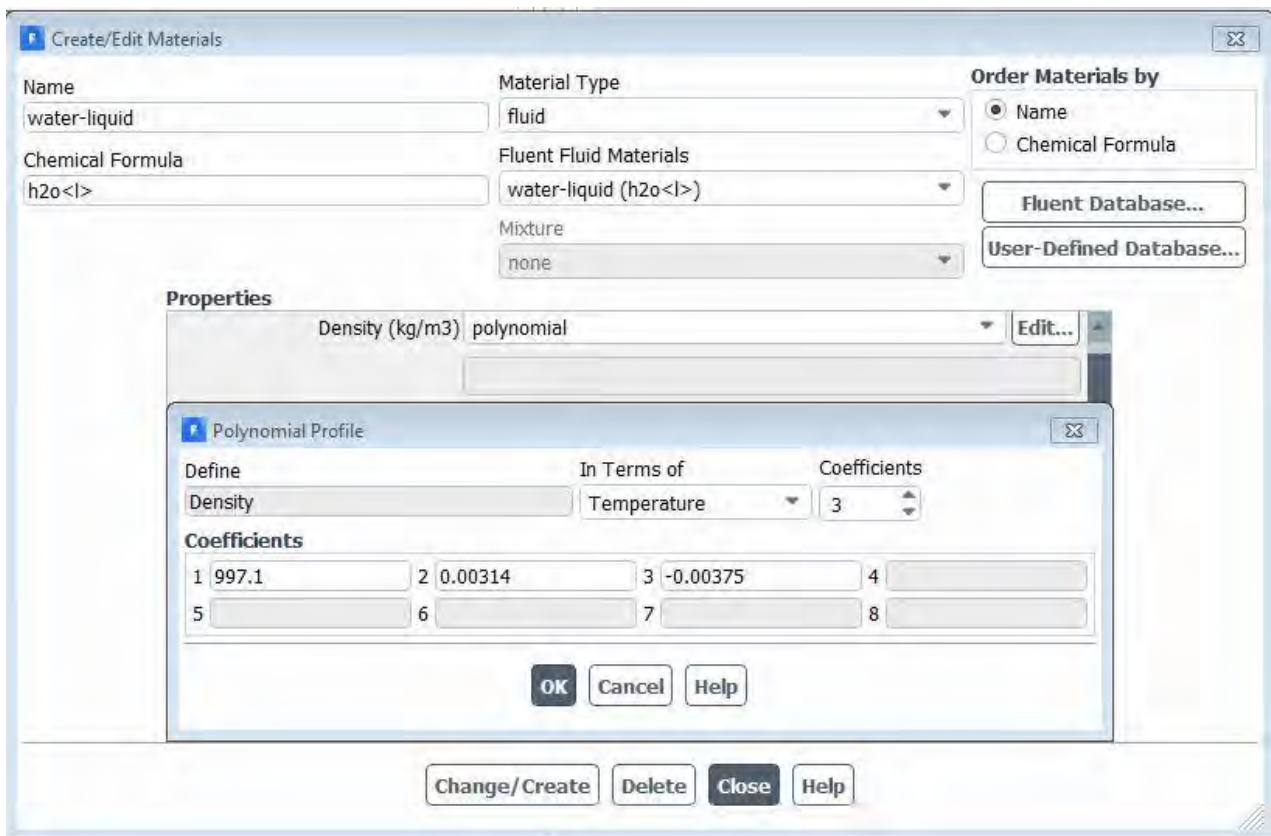


Рисунок 3.4 - Окно создания/редактирования материала: для определения полиномиального профиля для изменения свойств воды в зависимости от температуры

Естественная конвекция в воде моделировалась с использованием приближения Буссинеска. Таким образом, плотность воды рассматривалась как постоянное значение во всех решаемых уравнениях, за исключением члена

выталкивающей силы в уравнении количества движения (подробности см. в подразделе 2.2.1).

3.3 Зависимость теплофизических свойств материала от давления и температуры

Уравнения потока жидкости и теплопередачи, используемые для прогнозирования распределения температуры во время процесса обработки ВД, были адаптированы для включения теплофизических свойств воды при комбинированной зависимости давления от температуры.

Стандартная справочная база NIST (Национальный институт стандартов и технологий) 10 (база данных свойств пара NIST/ASME, версия 2.22) была использована для получения данных о теплофизических свойствах воды в диапазоне давления и температуры 0,1-600 МПа и 0°C - 120°C (273-393 К) соответственно. Получение путем множественного регрессионного анализа в Microsoft Excel уравнения комбинированной зависимости от давления (в МПа) и температуры (в К) плотности (кг/м^3), теплопроводности ($\text{Вт/м} \cdot \text{К}$) и вязкости ($\text{кг/м} \cdot \text{с}$) для воды представлены ниже.

$$\rho(P,T)=1161,37-0,28(P)-0,5(T), (R^2=0,989), \quad (3.4)$$

$$k(P,T)=0,19+3 \cdot 10^{-4}(P)+1,4 \cdot 10^{-4}(T), (R^2=0,980), \quad (3.5)$$

$$\mu(P,T)=0,0037+4,23 \cdot 10^{-7}(P)+1,4 \cdot 10^{-6}(T), (R^2=0,939) \quad (3.6)$$

Давление в приведенных выше уравнениях было заменено линейным профилем давления, зависящим от времени, $P=3,6 \cdot t-21,3$. Это было сделано потому, что мы вводим в программу увеличение давления как термин «источник теплоты (работа давления)». Программа численного моделирования не рассчитывает давление. Окончательные уравнения, сформированные для

температуры (в K) и времени (в s), были:

$$\rho(P, T) = 1155,41 - 0,5(T) + (t), \quad (3.7)$$

$$k(P, T) = 0,18 + 1,4 \cdot 10^{-4}(T) + 1,1 \cdot 10^{-4}(t), \quad (3.8)$$

$$\mu(P, T) = 3,7 \cdot 10^{-3} - 9,7 \cdot 10^{-6}(T) + 1,5 \cdot 10^{-6}(t). \quad (3.9)$$

Приведенные выше уравнения были включены в программу численного моделирования с использованием модуля пользовательских функций (*UDF*) *ANSYSFluent*. *UDF* - это C-коды, которые можно использовать для настройки решателя *ANSYSFluent*, то есть для предоставления решателю настроенных свойств материала, исходных условий, граничных условий и т.д.

3.4. Создание файла исходного кода на языке C [130]

После определения уравнений, зависящих от давления, температуры и времени для свойств, текстовый редактор *VisualStudio 2019* был использован для создания файла, содержащего код C, который реализует функцию. Файл исходного кода был сохранен с расширением *.c* (например, *cell_density.c*) в рабочей папке. Исходные коды можно найти в Приложении А.

Далее сохраненные файлы средствами компилятора *ANSYSFluent* были преобразованы в библиотеки граничных условий (рис. 3.5).

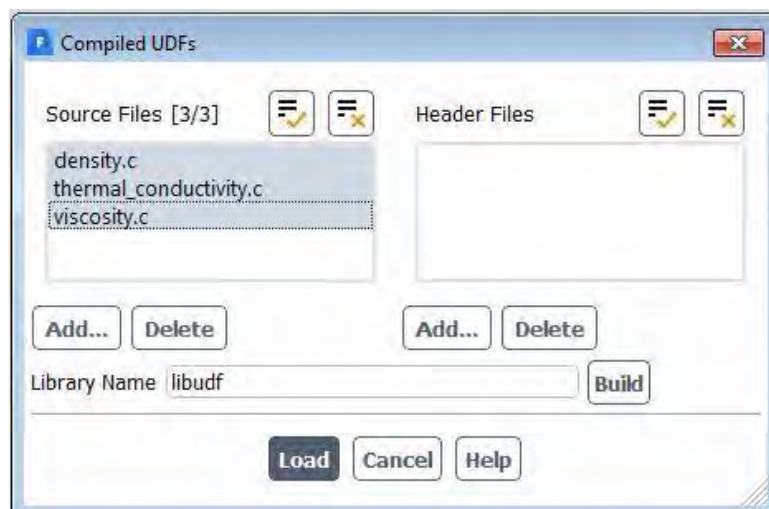


Рисунок 3.5 - Диалоговое окно компиляции UDF библиотеки

3.5 Присоединение *UDF* к *ANSYSFluent Solver*

Теперь, когда UDF был скомпилирован, его можно подключить к диалоговому окну свойств материала. В диалоговом окне создания/редактирования материалов был создан новый материал, т.е. вода-жидкость (water-liquid). На вкладке свойства, определяемые пользователем, выбираются из раскрывающегося списка рядом с определенным свойством (рис. 3.6), а затем выбирается имя *UDF*, соответствующее этому свойству. Определяемое пользователем свойство будет использоваться в последующем вычислении.

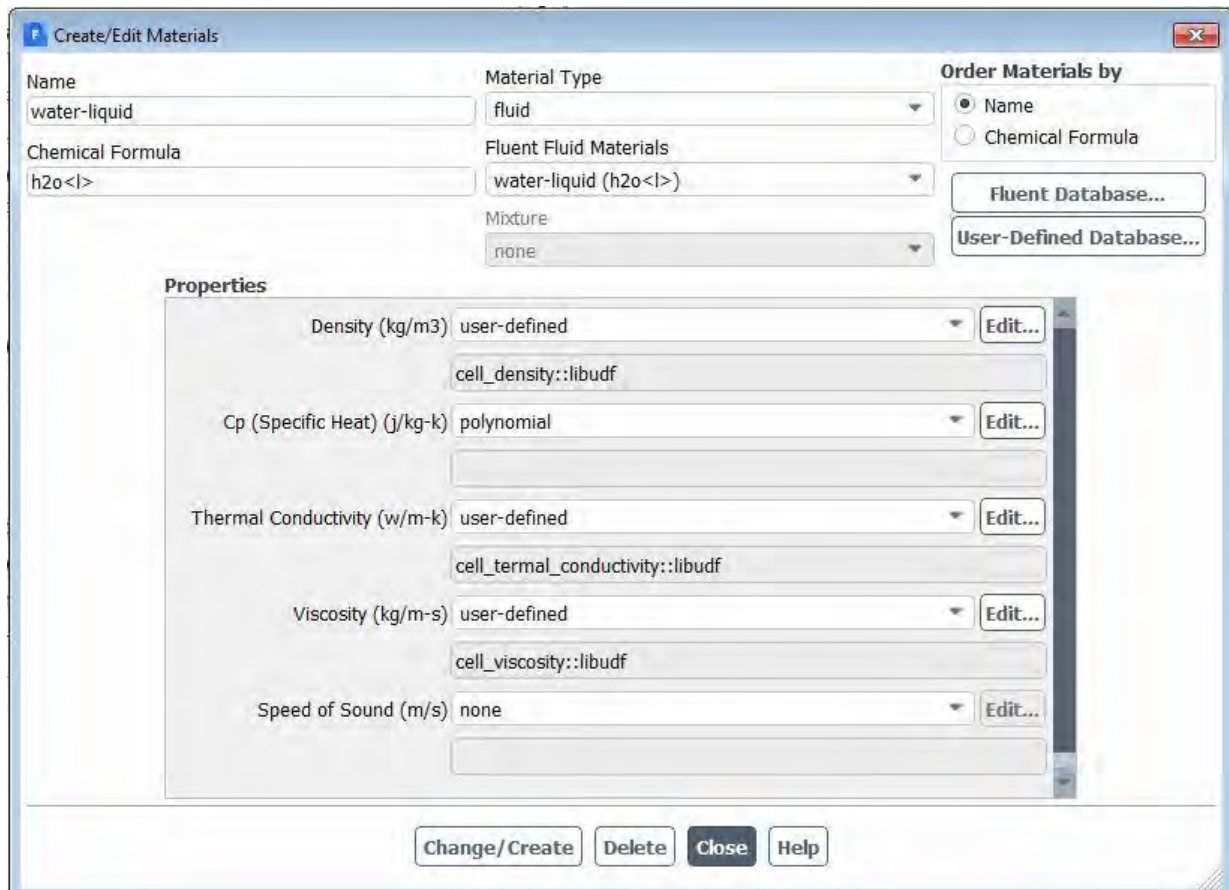


Рисунок 3.6 - Окно создания/редактирования материалов, показывающее присоединение *UDF* к свойствам материала

3.6 Определение граничных условий

Впоследствии были определены граничные условия для вычислительной области. Граничное условие оси было определено на средней линии осесимметричной геометрии. Сила тяжести определялась в осевом направлении для вертикальной камеры. Связанное тепловое граничное условие было определено между водяным столбом и стальной стенкой камеры, т. е. обе области сплошной среды (твердая сталь и вода как жидкость) были связаны общей кромкой. Кроме того, для модели изоляции были определены связанные граничные условия между: водой и поверхностями термоизоляционной вставки; термоизоляционной вставки и твердой стали. Воздушный зазор в камере ВД был очень тонким, поэтому предполагалось, что передача теплоты происходит посредством теплопроводности, и, следовательно, уравнение теплопроводности решалось в воздушном зазоре. На внешней поверхности камеры использовалось граничное условие тепловой конвекции для стенок с коэффициентом теплоотдачи $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ на вертикальной боковой и нижней стенках и $5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ на верхней стенке.

Граничное условие для подачи воды в камеру было определено на период повышения давления, чтобы компенсировать уменьшение объема, значение $v_{\text{выход}}$, равное $0,28 \text{ м/с}$, было определено (2.27) для вертикальной камеры, как рассчитано в подразделе 2.2.5.

3.7 Определение методов решения

В поле пространственной дискретизации из раскрывающегося списка для градиента был выбран метод наименьших квадратов. Схема решения второго порядка была выбрана для воздуха по плотности, импульсу и энергии. В формулировке переходных процессов неявный решатель второго порядка (рис. 3.7), использовался для решения тепловых полей и полей скорости.



Рисунок 3.7 - Окно настройки решателя ANSYS *Fluent*

Чтобы указать сходимость решения, были определены критерии сходимости для невязок, таких как непрерывность, x -скорость, y -скорость, энергия, k и ε . Критерии абсолютной сходимости (если значение остатка меньше значения, определенного пользователем, тогда решение считается сошедшимся) были определены для всех остатков 10^{-6} (рис. 3.8).

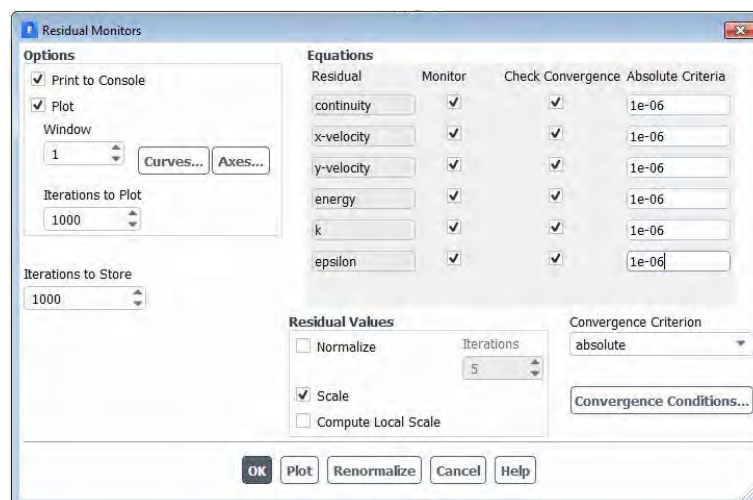


Рисунок 3.8 - Окно для определения критериев сходимости

3.8 Расчет модели

Модель была инициализирована при заданной начальной температуре воды и массе камеры. Размер временного шага 0,1 с использовался (рис. 3.9). Количество временных шагов определялось исходя из потребностей конкретного случая.



Рисунок 3.9 - Окно итераций, отображаемое в программе ANSYSFluent

Вычислительное время, необходимое для запуска типичного моделирования вертикальной двумерной осесимметричной геометрии, составило примерно 6-8 часов на персональном компьютере с процессором AMDFM(tm)-8120 Eight-CoreProcessor 3.1 GHz и 12 ГБ ОЗУ.

3.9 Выводы по разделу

1. Камера ВД из-за своей осевой симметрии смоделирована как осесимметричный в двух плоскостях цилиндр, а численное моделирование выполнялось в радиальном срезе цилиндра.

2. Определены граничные условия для области моделирования. Осевые граничные условия определялись на геометрической оси осесимметричного геометрического элемента. Сопряженные тепловые граничные условия были определены между водным столбом и стальной камерой, то есть обе непрерывные области (твердая сталь и вода в качестве жидкости) были объединены общим ребром.

3. Для модели с изоляцией граничные условия определены между водой и термоизоляцией, термоизоляцией и твердой стальной поверхностью. Относительно внешней поверхности камеры, было использовано граничное условие тепловой конвекции для стенок с коэффициентом теплопередачи в $10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ на вертикальной боковой и нижней стенке, и $5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ – для верхней стенки.

4. Для вертикальной камеры на период повышения давления, при подаче воды в камеру, чтобы компенсировать уменьшение объема, определено граничное условие со значением $v_{\text{выход}} = 0,28 \text{ м/с}$.

РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Результаты численного моделирования теплообменных процессов

Несмотря на то, 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 толстой стенкой камеры. Полученное различие плотности содействует образованию конвекционных потоков внутри нагнетательной среды (воды). Чтобы подчеркнуть важность образования конвекции в модели, было спрогнозировано распределение температуры для случая без конвекции, то есть случая с теплообменом исключительно проводимостью, в сравнении со случаем, когда происходит сопряженный теплообмен (проводимость и конвекция).

Теплопередача исключительно проводимостью

Численное моделирование было выполнено для предположения распределения температуры в воде и стенке камеры, когда первичным механизмом теплообмена была проводимость. Для этой модели гравитация не принималась во внимание. Ведь перенос теплоты от воды происходит только на стенках из-за различий между температурой воды и стальной стенки. Начальная температура воды и стальной стенки составляла 298,15 К [107, 108]. Была выбрана температура 298,15 К из-за того, что именно такой была температура окружающей среды, стальной конструкции и воды во время проведения эксперимента. Для сравнения численно прогнозируемых результатов с экспериментальными данными было выполнено численное моделирование с начальной температурой 298,15 К. Работа сил давления учитывалась в модели как член источника в граничном условии воды для нагнетания давления в камеру до 586 МПа. Работа сил давления рассчитана по

(2.25), была введена в граничное условие нагнетания воды в рабочую камеру до давления 586 МПа, а значение dT/dp , интерполировано при температуре 298,15 К из таблицы 2.3.

На рис. 4.1 изображены изотермы, полученные вследствие математического моделирования. Как можно увидеть на рис. 4.1 (а), температура воды повышалась с начального значения 298,15 К до 315 К в конце нагнетания давления из-за нагревания при адиабатном сжатии. Различие между температурой воды и температурой стенки камеры приводит к потере тепла из-за проводимости стенки, которая, в свою очередь, формирует градиенты температуры в воде вблизи стенки, как изображено на рис. 4.1 (б). Температура воды вблизи стенки падает до 306 К в конце времени выдержки. Таким образом, наблюдается процесс проводимости, который формирует градиенты температуры в воде как в радиальном, так и в аксиальном направлениях.

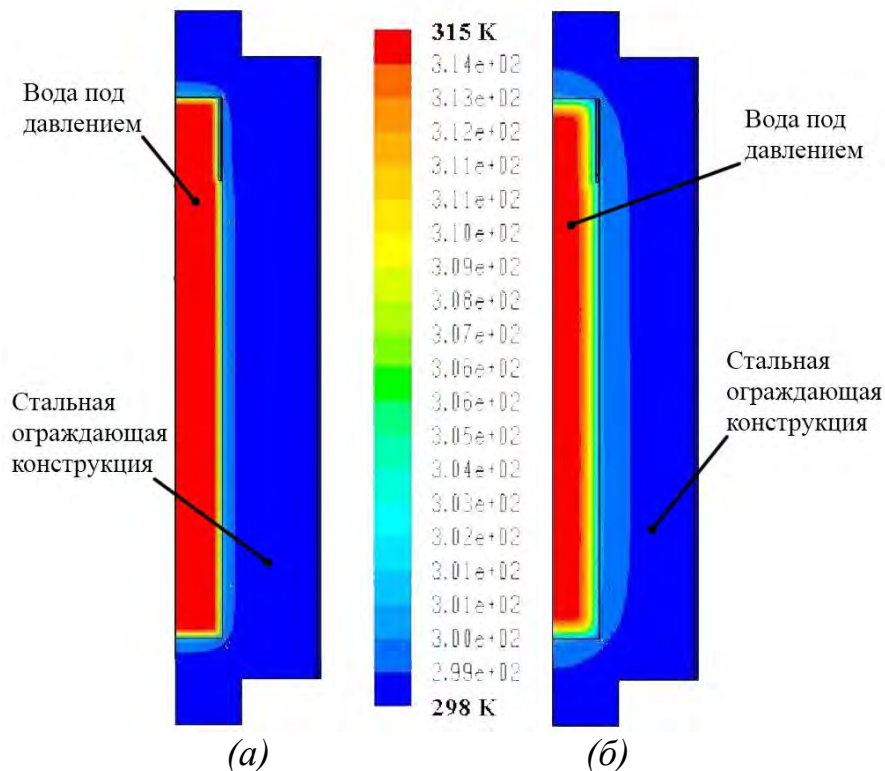


Рисунок 4.1 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 298,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с) только при теплопроводности

Сопряженная теплопередача

Для сопряженной теплопередачи, то есть когда конвекция в воде смоделирована совместно с проводимостью в стенке камеры, было вычислено число Грасгофа (Gr) при комнатной температуре (298,15 К), которым характеризуется участок переходного потока. Данные температуры были спрогнозированы как для ламинарного, так и турбулентного потока, после чего сопоставлены с данными эксперимента [107, 108]. Для учета теплопередачи с конвекцией в модель была введена гравитация, а для плотности воды было использовано приближение Буссинеска. Начальная температура воды и стальной стенки камеры составляли 298,15 К. В камере было установлено давление в 586 МПа, то есть в модели работа сил давления введена как член источника в граничном условии воды. Работа сил давления, которая использована в модели, была тождественная той, что и для случая лишь с проводимостью.

Относительно потока, смоделированного как ламинарный, на рис. 4.2 изображены изотермы, полученные в конце нагнетания давления (180 с) и в конце выдержки (780 с). Температура воды повышалась от начальной температуры в 298,15 К до максимальной – 315 К в конце нагнетания давления вследствие адиабатной генерации тепла в воде, как изображено на рис. 4.2 (а). Мы можем наблюдать, что появилась температурная неоднородность в конце нагнетания давления из-за комбинированного влияния адиабатной генерации тепла в воде и охлаждения стенок. Было установлено, что неоднородность температуры становится большей во время периода выдержки и остается такой, когда максимальная температура в камере падает до 309 К в конце периода выдержки, как изображено на рис. 4.2 (б). Градиенты температуры, которые идут снизу камеры, указывают на конвекционные потоки в воде. Также на рис. 4.3 представлены соответствующие направления потоков в воде в конце нагнетания давления и в конце периода выдержки. Структура не установившегося потока указывает на то, что поток еще полностью не установился, поэтому, вероятно, ламинарная модель является неуместной.

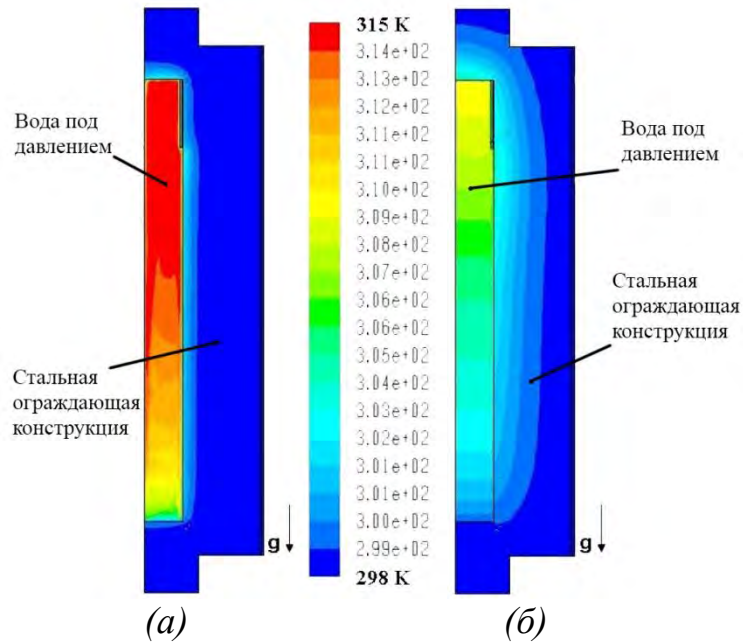


Рисунок 4.2 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 298,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче и ламинарном течении потока

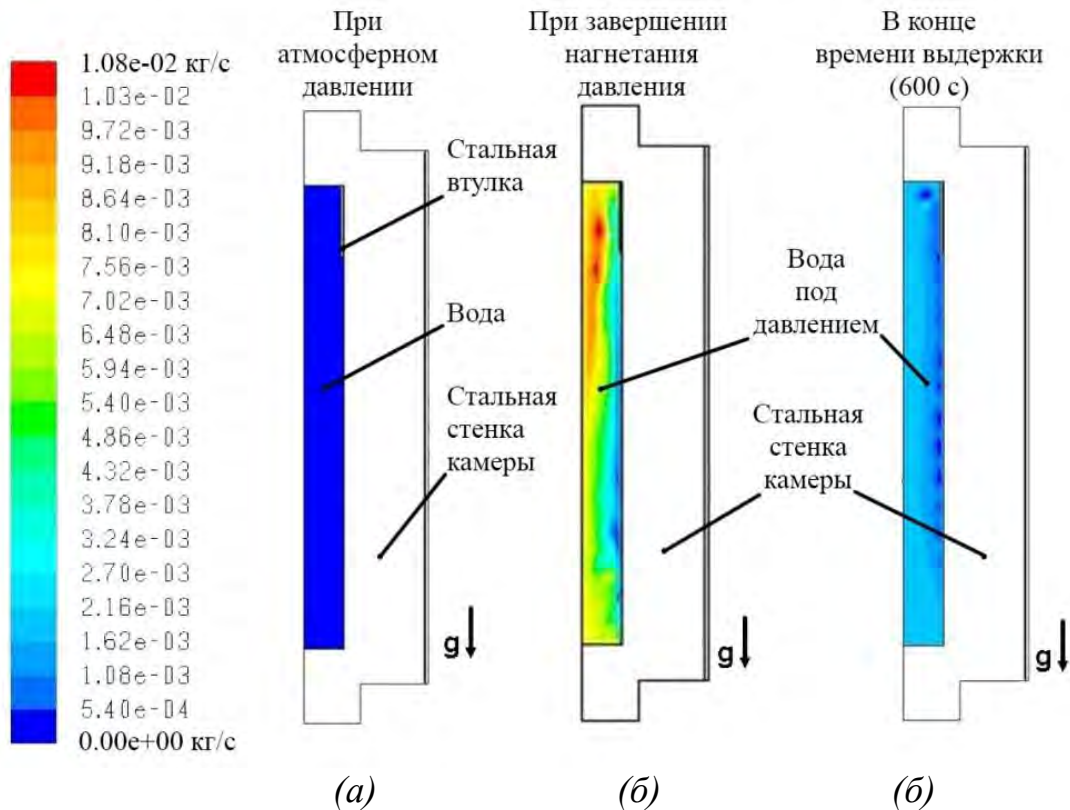


Рисунок 4.3 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 298,15$ К, $P = 586$ МПа, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) этапа выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче, когда поток смоделирован как ламинарный

Относительно потока, смоделированного как турбулентный с помощью модели $k-\varepsilon$, на рис. 4.4 (а) изображены изотермы в воде и стенке камеры в конце нагнетания давления, когда давление повышалась до 586 МПа за 180 с при начальной температуре камеры и воды в 298,15 К. На рис. 4.4 (б) изображены изотермы в конце периода выдержки, когда давление поддерживалась на уровне 586 МПа на протяжении 600 с. Как можно увидеть, максимальная температура в камере в конце нагнетания давления достигает 315 К, а на дне камеры выявлены признаки неоднородности. Максимальная температура в камере падает до 307 К в конце периода выдержки. Также на рис. 4.5 представлены соответствующие направления потоков в воде в конце нагнетания давления и в конце периода выдержки.

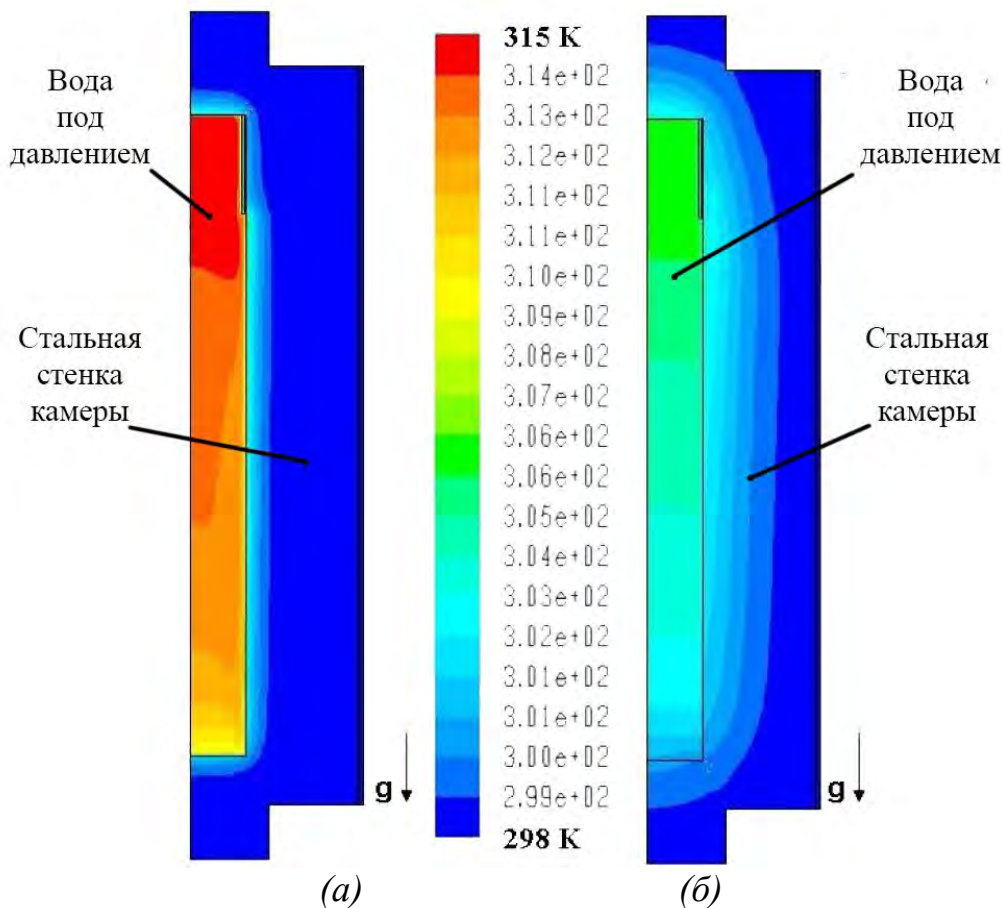


Рисунок 4.4 -Изотермы в воде и камере $T_{нач} = 298,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапе выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче и турбулентном потоке

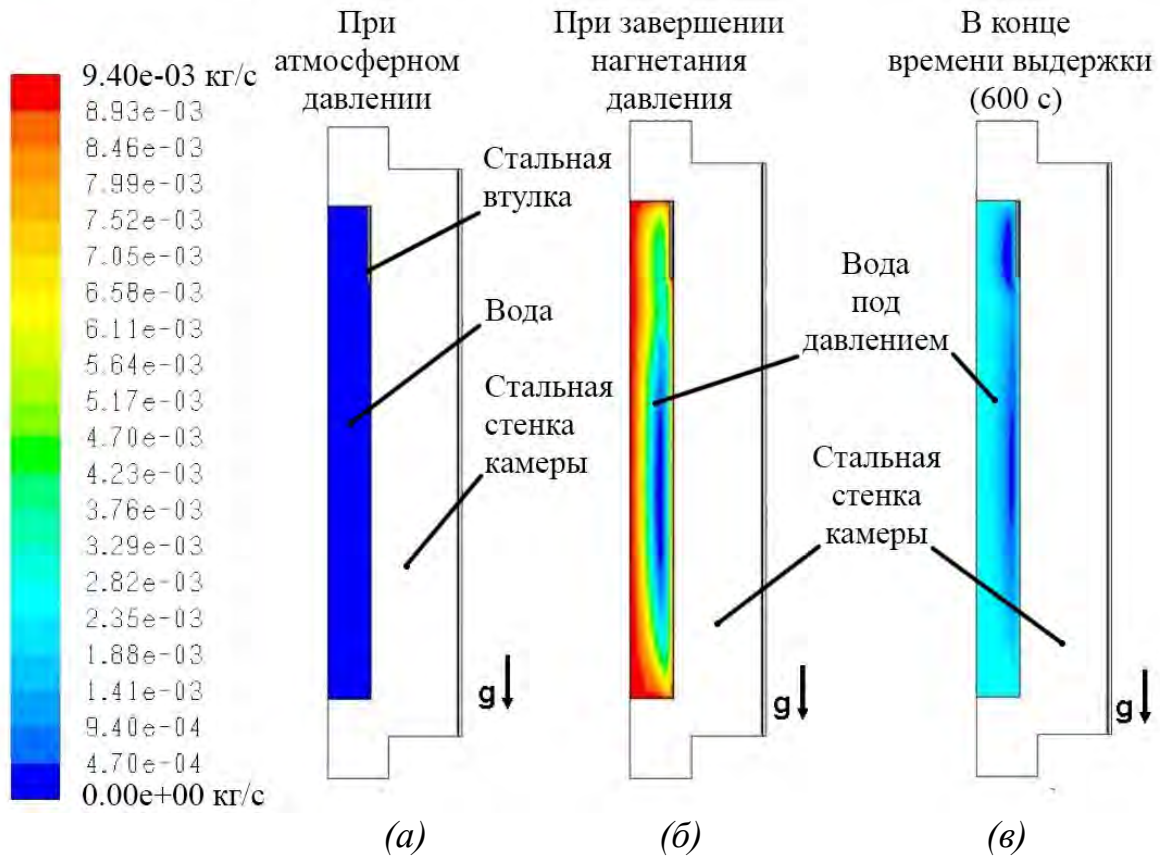


Рисунок 4.5 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 298,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, (a) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) этапа выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче, когда поток смоделирован как турбулентный

Проводимость и сопряженная теплопередача

Сравнение между изотермами, полученными только для конвекции и сопряженной теплопередачи, свидетельствует, что несмотря на то, что максимальная температура, достигнутая в конце нагнетания давления, в обоих случаях является одинаковой, то есть 315 К, в случае только проводимости наблюдались градиенты температуры вблизи стенки камеры, тогда как в случае с конвекцией – температурные градиенты шли снизу вверх совместно с потерей тепла на стенке. В конце периода выдержки было выявлено, что максимальная температура в камере в случае лишь проводимости составляла 315 К, тогда как для сопряженной теплопередачи она упала до 306 К. Для сравнения изменения

температуры только для проводимости и для случая с сопряженной теплопередачей, был составлен график изменения безразмерной температуры $[(T - T_{нач}) / (T_{max} - T_{нач})]$ в аксиальной и радиальной плоскостях (рис. 4.6). T_{max} – максимальная температура, была получена с помощью программы *ANSYS Fluent* в течении времени моделирования - температуры по соответствующим плоскостям. Как видно из рис. 4.7, введение конвекции в модель делает температуру более однородной радиально, тогда как аксиальное изменение температуры между верхом и низом столба воды является большим для случая сопряженной теплопередачи, чем в случае проводимости (см. рис. 4.8).

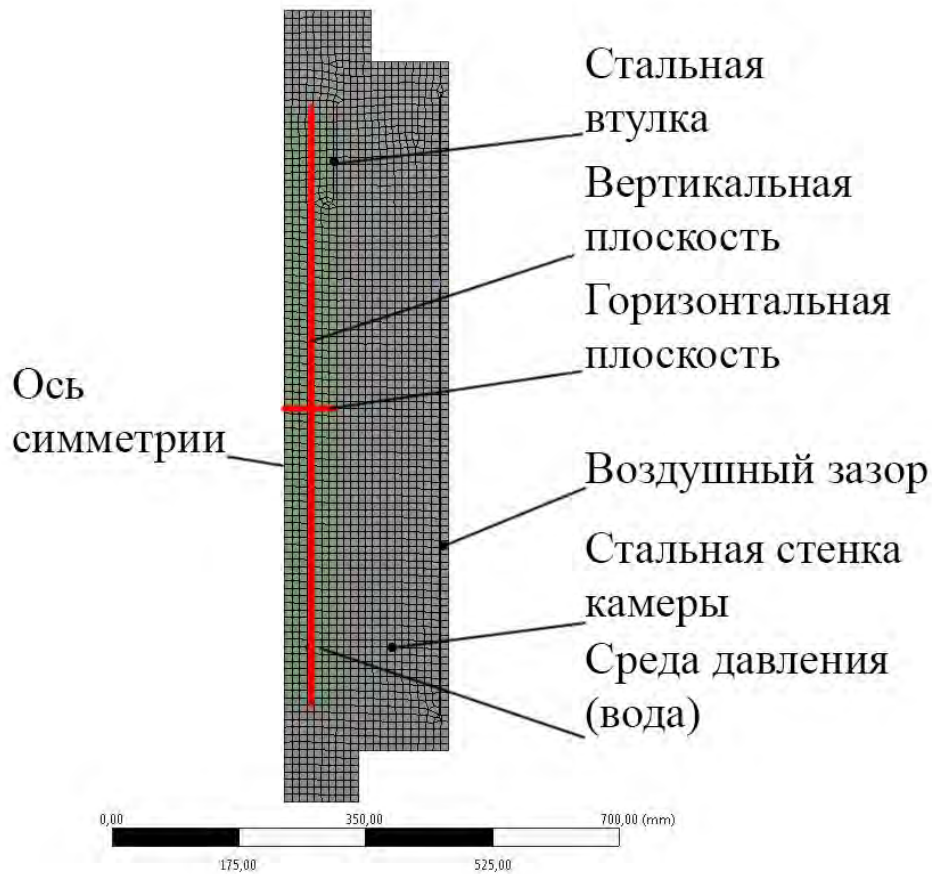


Рисунок 4.6 - Расчетная область ВД с указанием вертикальной и горизонтальной плоскостей, вдоль которых построен график изменения температуры

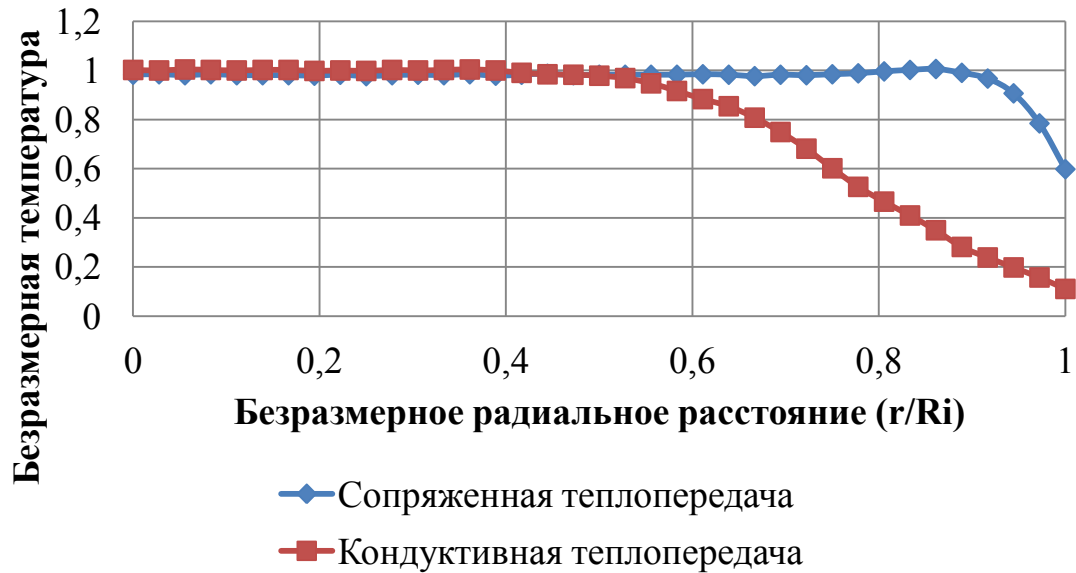


Рисунок 4.7 - Численно спрогнозированное изменение безразмерной температуры вдоль горизонтальной средней плоскости в конце периода выдержки давления (780 с) для теплопередачи проводимостью и сопряженной теплопередачи

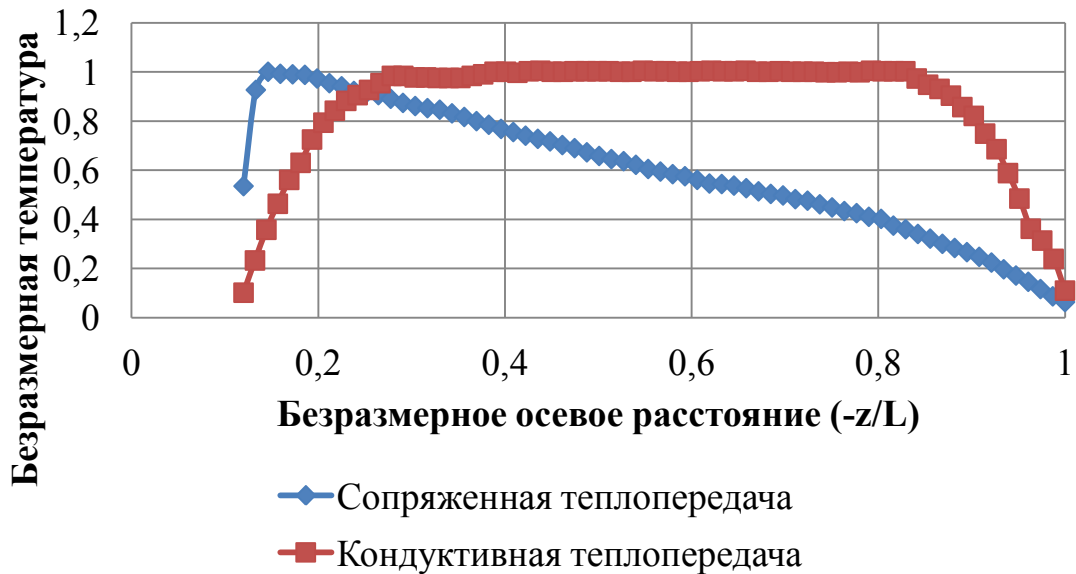


Рисунок 4.8 - Численно спрогнозированное изменение безразмерной температуры вдоль вертикальной плоскости в конце периода выдержки давления (780 с) для теплопередачи проводимостью и сопряженной теплопередачи

Сопряженная теплопередача (ламинарный/турбулентный поток)

Изотермы и линии тока, рассчитанные численно для сопряженного теплообмена с ламинарным и турбулентным потоками соответственно, оказались разными. Градиенты температуры, возникающие у дна при моделировании ламинарного потока, оказались неупорядоченными, как показано на рис. 4.2, по сравнению с плавными в случае турбулентного потока (рис. 4.4). Максимальная температура воды в конце периода выдержки составляла 309 К для ламинарного потока, тогда как она составляла 306 К для турбулентного потока. Кроме того, для сравнения ламинарного и турбулентного потоков были построены графики изменения безразмерной температуры вдоль горизонтальной средней плоскости и вертикальной плоскости, как показано на рис. 4.9 и 4.10 соответственно.

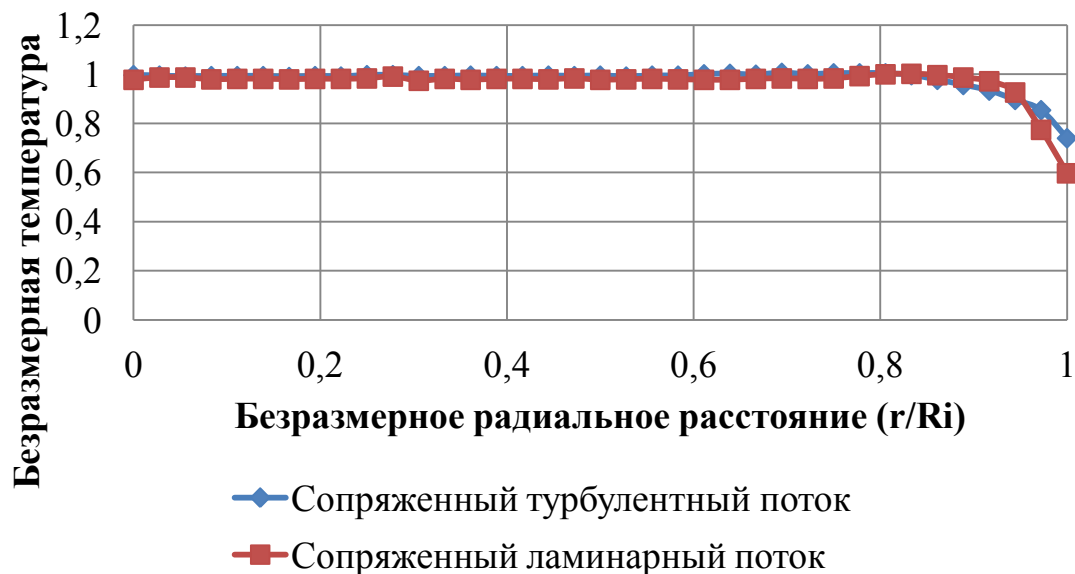


Рисунок 4.9 - Численно спрогнозированное изменение безразмерной температуры вдоль горизонтальной плоскости в конце периода выдержки давления (780 с) для сопряженной теплопроводности, смоделированной для ламинарного и турбулентного потока

Было замечено, что, хотя не было разницы между колебаниями температуры вдоль горизонтальной средней плоскости (рис. 4.9), турбулентность влияет на изменение однородной температуры вдоль вертикальной плоскости по сравнению с ламинарным потоком (рис. 4.10). Кроме того, линии тока для турбулентного потока показывают, что поток более устойчивый по сравнению с ламинарным потоком (рис. 4.5).

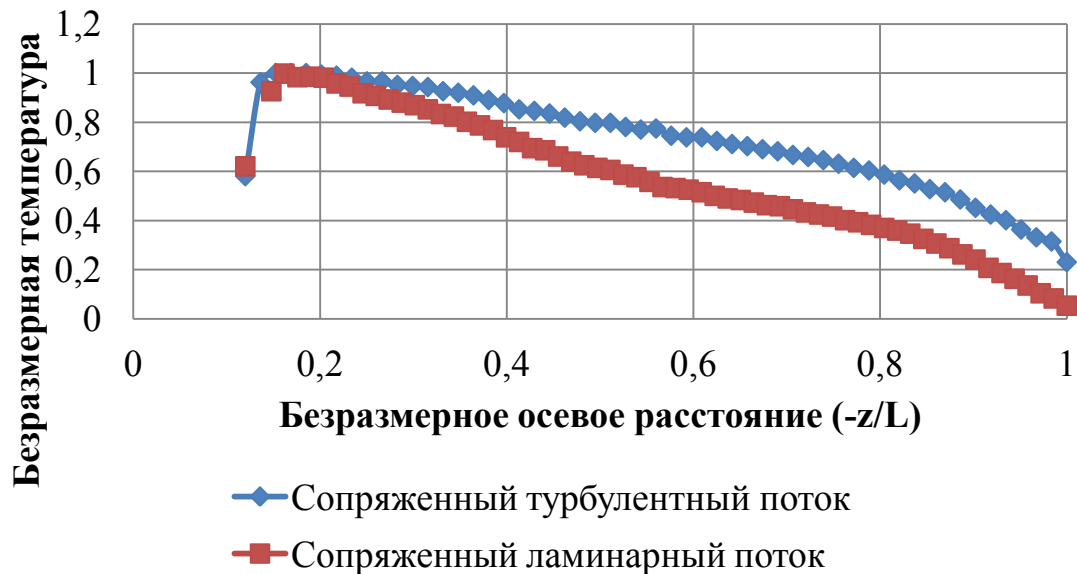


Рисунок 4.10 - Численно спрогнозированное изменение безразмерной температуры вдоль вертикальной плоскости в конце периода выдержки давления (780 с) для сопряженной теплопроводности, смоделированной для ламинарного и турбулентного потока.

Численное моделирование было проведено при начальной температуре 288,15 К, потому что при проведении эксперимента при температуре окружающей среды, температура камеры и воды были идентичными. На рис. 4.11 изображены изотермы в воде и стенке камеры при начальной температуре в 288,15 К и давлении 586 МПа. Наблюдается такая же картина, что и в случае с начальной температурой 298,15 К. Векторы скорости на рис. 4.11 (в) указывают, что итоговые различия плотности в нагнетательной среде приводят к образованию нисходящего потока жидкости вблизи стенки.

Ведь структура циркуляции в нагнетательной среде устанавливается как нисходящий поток близ боковой стенки камеры и восходящий поток внутри.

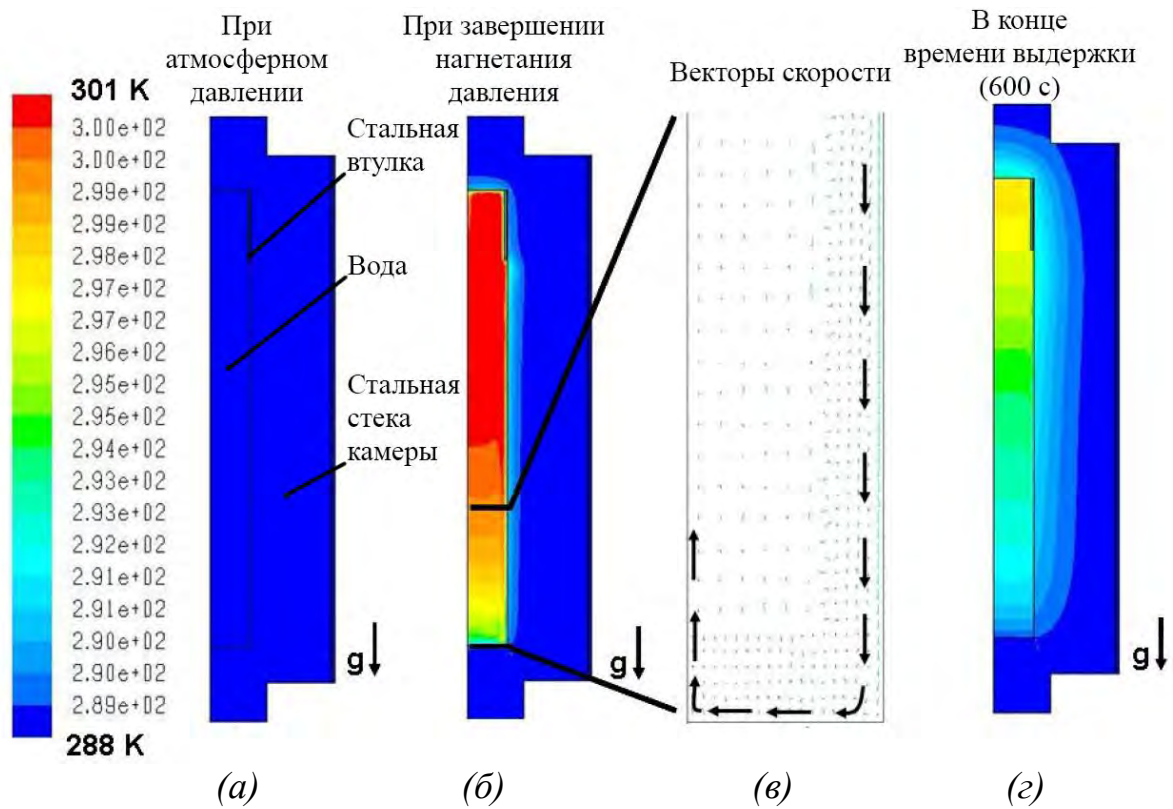


Рисунок 4.11 – Изотермы в воде и камере при $T_{нач} = 288,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания, (в) векторы скорости в воде и (г) в конце периода выдержки для сопряженной теплопередачи, смоделированной для турбулентного потока

Сопряженная теплопередача при повышенной начальной температуре

На рис. 4.12 изображены изотермы, когда начальная температура составляла 313,15 К. Как можно увидеть, они имеют такое же направление, что и в случае комнатной температуры: сначала однородная температура становится неоднородной в конце нагнетания давления из-за адиабатной генерации тепла в воде и нагрева стенок.

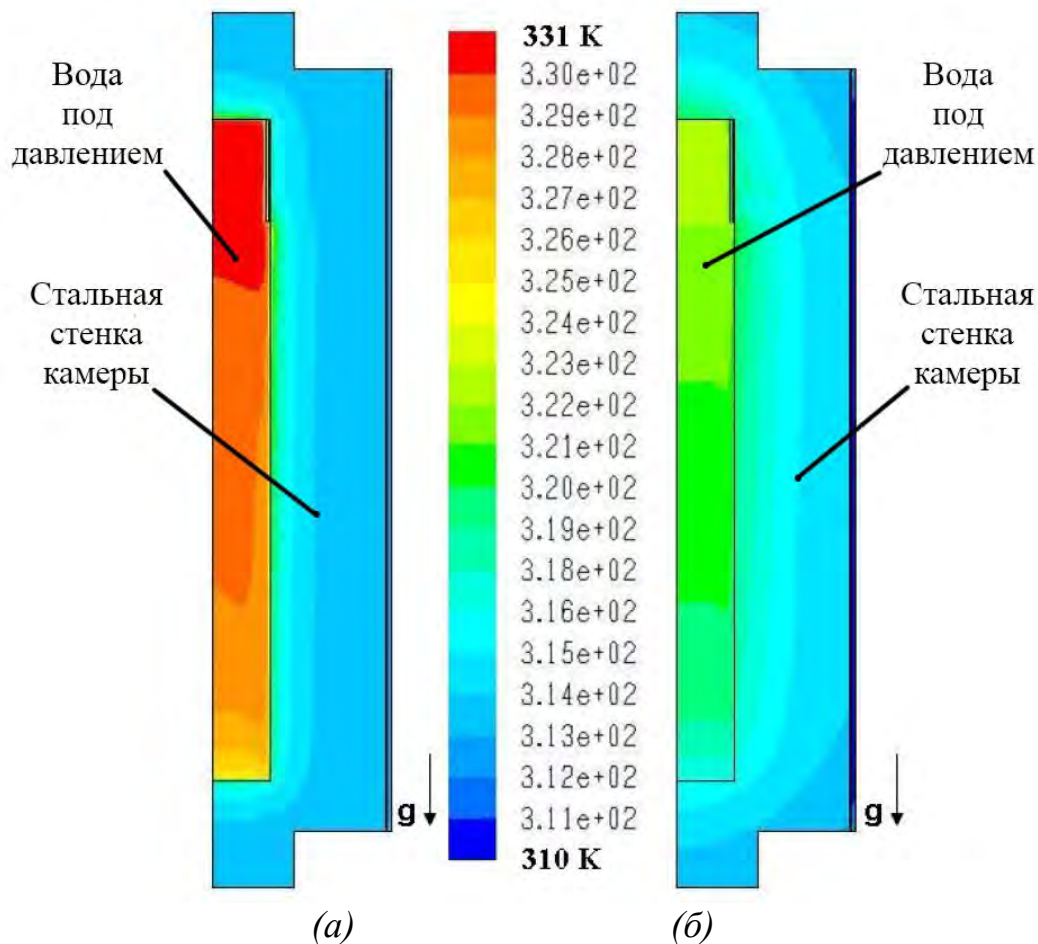


Рисунок 4.12 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 313,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапе выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче с турбулентным потоком

Максимальная температура в камере в конце сброса давления составляла 331 К, тогда как в конце периода выдержки максимальная температура воды упала до 323 К. Также увеличились изменения температуры во время периода выдержки, которые оставались такими на протяжении всего периода выдержки. На рис. 4.13 представлены направления потоков в воде в конце нагнетания давления и в конце периода выдержки.

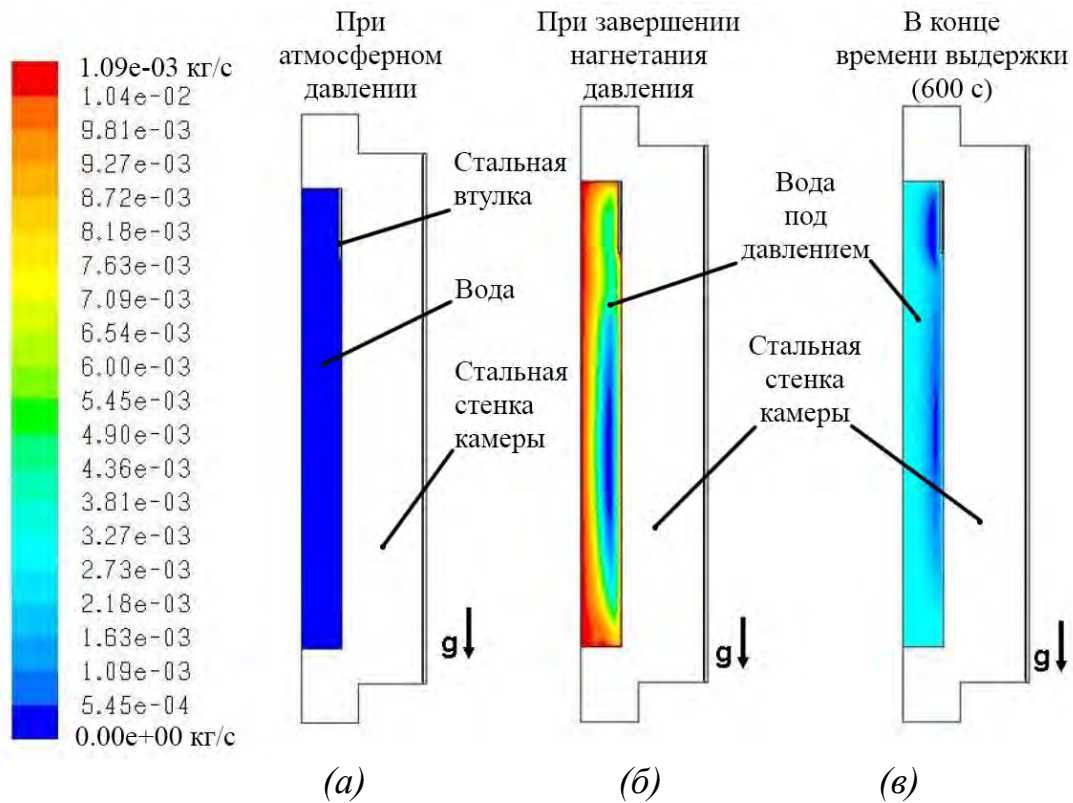


Рисунок 4.13 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 313,15 \text{ К}$, $P = 586 \text{ МПа}$,
 (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания (180 с) и (в) этапе
 выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче с турбулентным потоком

Подобным образом были спрогнозированы изотермы и направления потоков для начальных температур в 333,15 К и 353,15 К, представленные на рис. 4.14 – 4.17, соответственно. Наблюдалось, что результаты, полученные при повышенных начальных температурах, также отвечали общему направлению, как и при комнатной температуре.

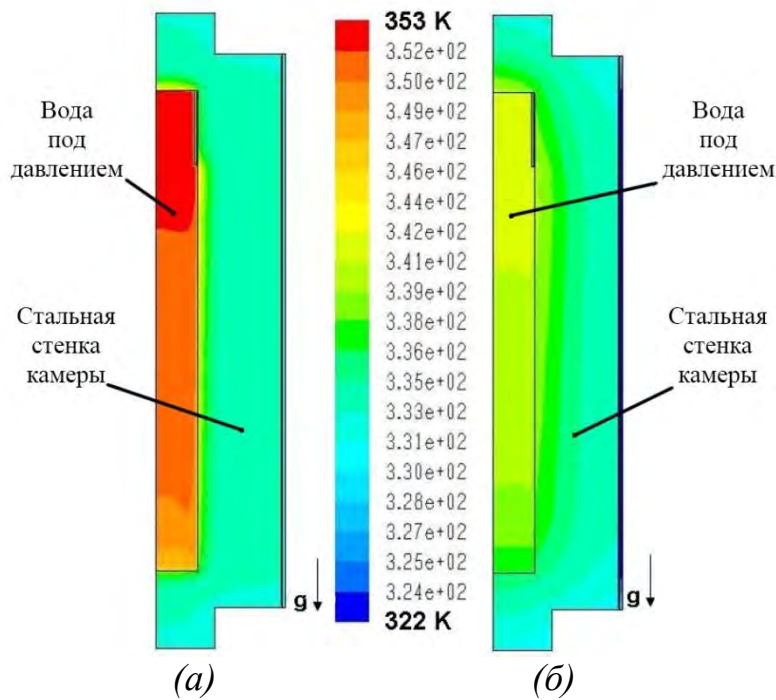


Рисунок 4.14 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 333,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапе выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче, смоделированной для турбулентного потока

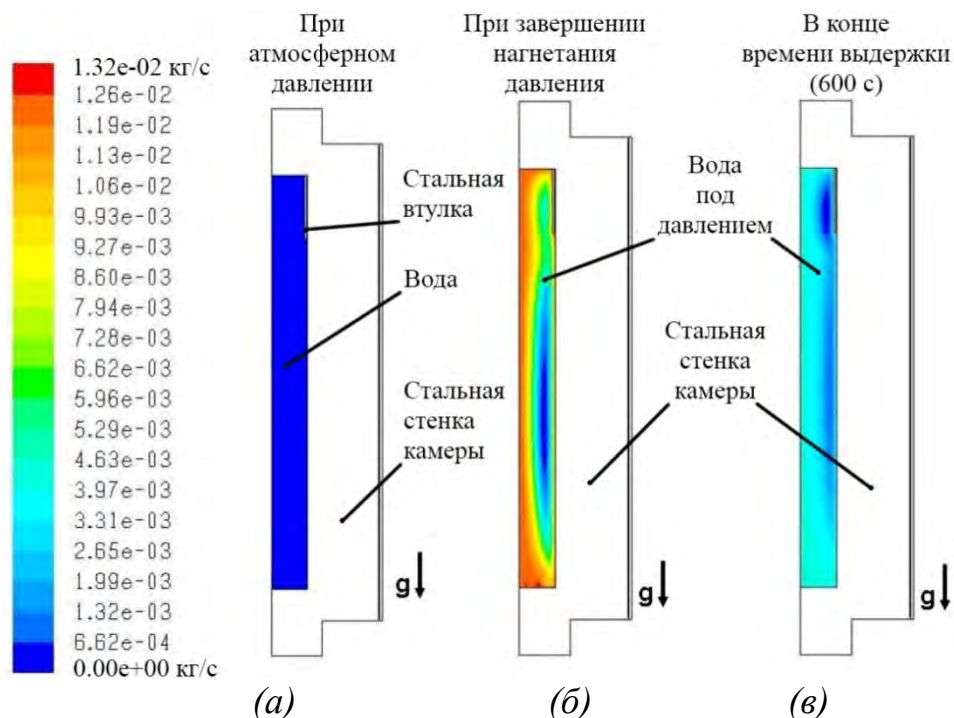


Рисунок 4.15 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 333,15 \text{ K}$, $P = 586 \text{ МПа}$, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) этапе выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче с турбулентным потоком

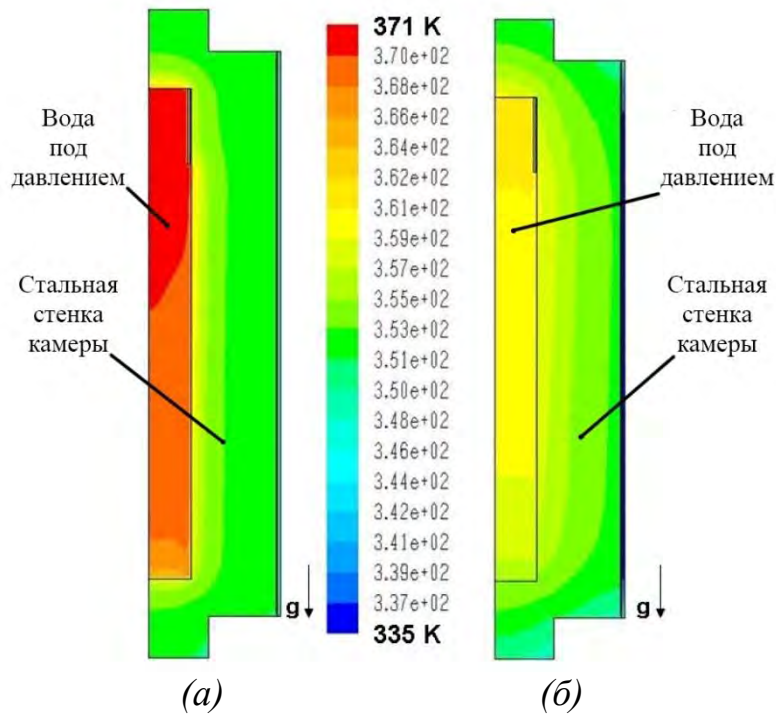


Рисунок 4.16 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 353,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче с турбулентным потоком

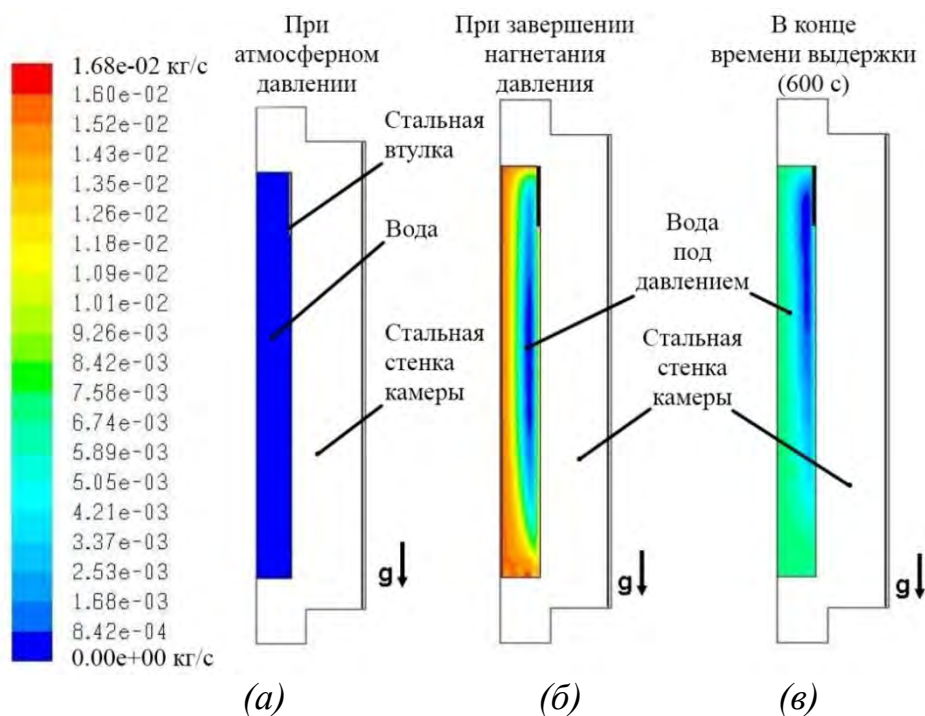


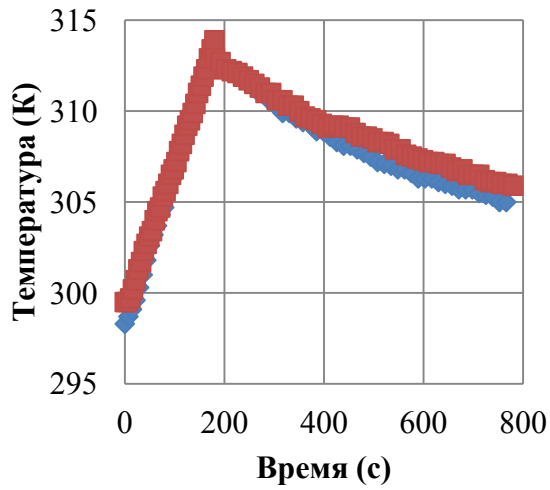
Рисунок 4.17 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 353,15$ К, $P = 586$ МПа, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) этапа выдержки (780 с) при сопряженной теплопередаче с турбулентным потоком

4.2 Результаты экспериментов по влиянию различных факторов на характер температурного поля

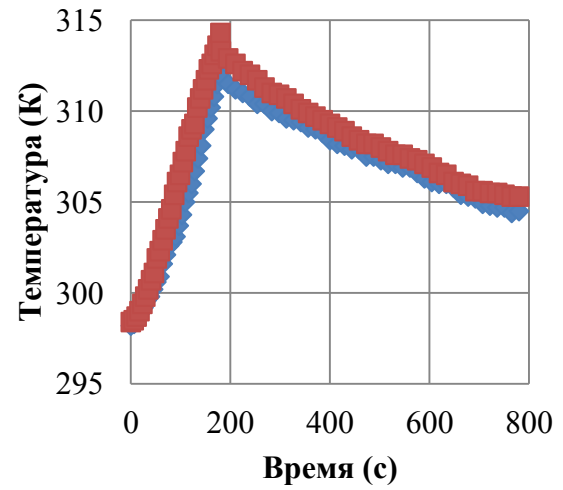
Из экспериментов, проведенных для измерения реакции термопар, была вычислена постоянная времени (τ) для каждой термопары – от 5 до 7 с в реперных точках (температура таяния льда и кипения воды), тогда как при 50°C (323,15 К) значение постоянной времени оказались в диапазоне 10-14 с. С помощью дисперсионного анализа (ANOVA) данных постоянной времени, было выявлено, что время реакции термопары больше зависит от температуры, чем от длины трубки термопары. Значение постоянной времени в 10 с введено в написанную программу в формате EXCEL для поправки экспериментальных данных на задержку термопары.

Сравнение численно спрогнозированных данных с экспериментальными

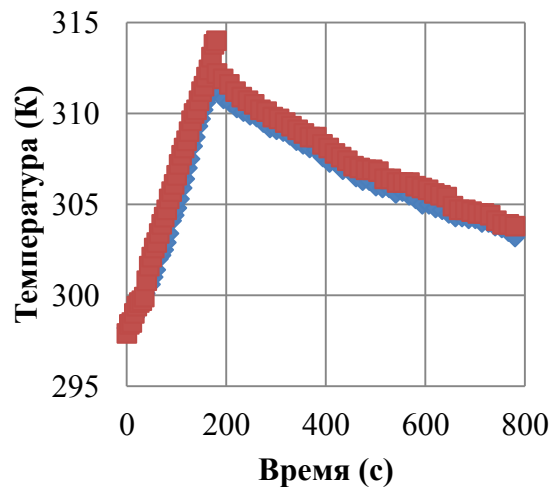
Значения времени и температуры в период нагнетания давления и в период выдержки под ВД были экспериментально зафиксированы в трех точках термопар в камере для ОВГД, а также численно спрогнозированы для тех самых точек, как указано на рис. 3.2, при разных начальных температурах с целью подтверждения численного моделирования. На рис. 4.18 и 4.19 представлены сравнения между скорректированными экспериментальными (где экспериментальные данные были откорректированы на время реакции термопар с помощью уравнений (2.77), (2.82) и (2.87) 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. Было получено довольно неплохое согласование между скорректированными экспериментальными температурами и численно спрогнозированными значениями с начальными температурами 298,15 К и 288,15 К.



(a)



(б)



(в)

◆ Численно спрогнозированные значения
■ Корректированные экспериментальные значения

Рисунок 4.18 - Сравнение корректированных 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

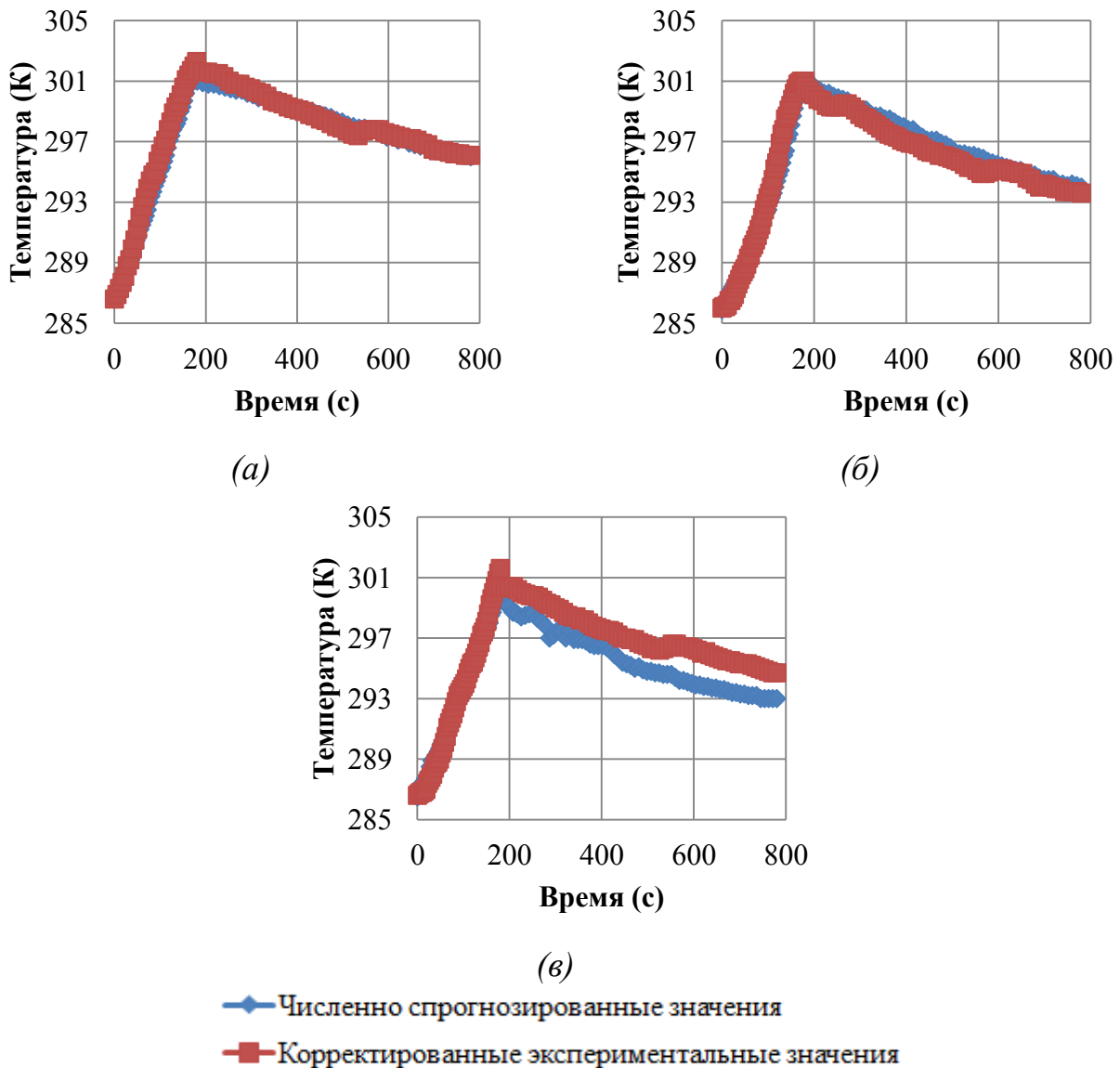


Рисунок 4.19 - Сравнение скорректированных экспериментальных и численно спрогнозированных временно - температурных изменений при $T_{нач} = 288,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

Подобным образом представлено сравнение при повышенных начальных температурах, соответственно $T_{нач} = 313,15$ К (рис. 4.20) и $T_{нач} = 333,15$ К (рис. 4.21). При начальных температурах в 313,15 К и 333,15 К численно спрогнозированные температуры оказались выше, чем экспериментальные значения в конце нагнетания давления и после этого. Это можно объяснить повышенной теплотворной способностью при сжатии (2,8 ... 3,4 К) для 313,15 К

и (3,8 ... 4,2 К) для 333,15 К, что были использованы во время моделирования и были взяты в стандартной базе справочных данных NIST (предоставленных в таблице 2.3) по сравнению со значениями теплотворной способности при сжатии, которые указаны другими исследователями для этих температур. Другой причиной может стать и то, что у численно спрогнозированных данных влияние добавления воды в камеру во время нагнетания давления не учитывалось.

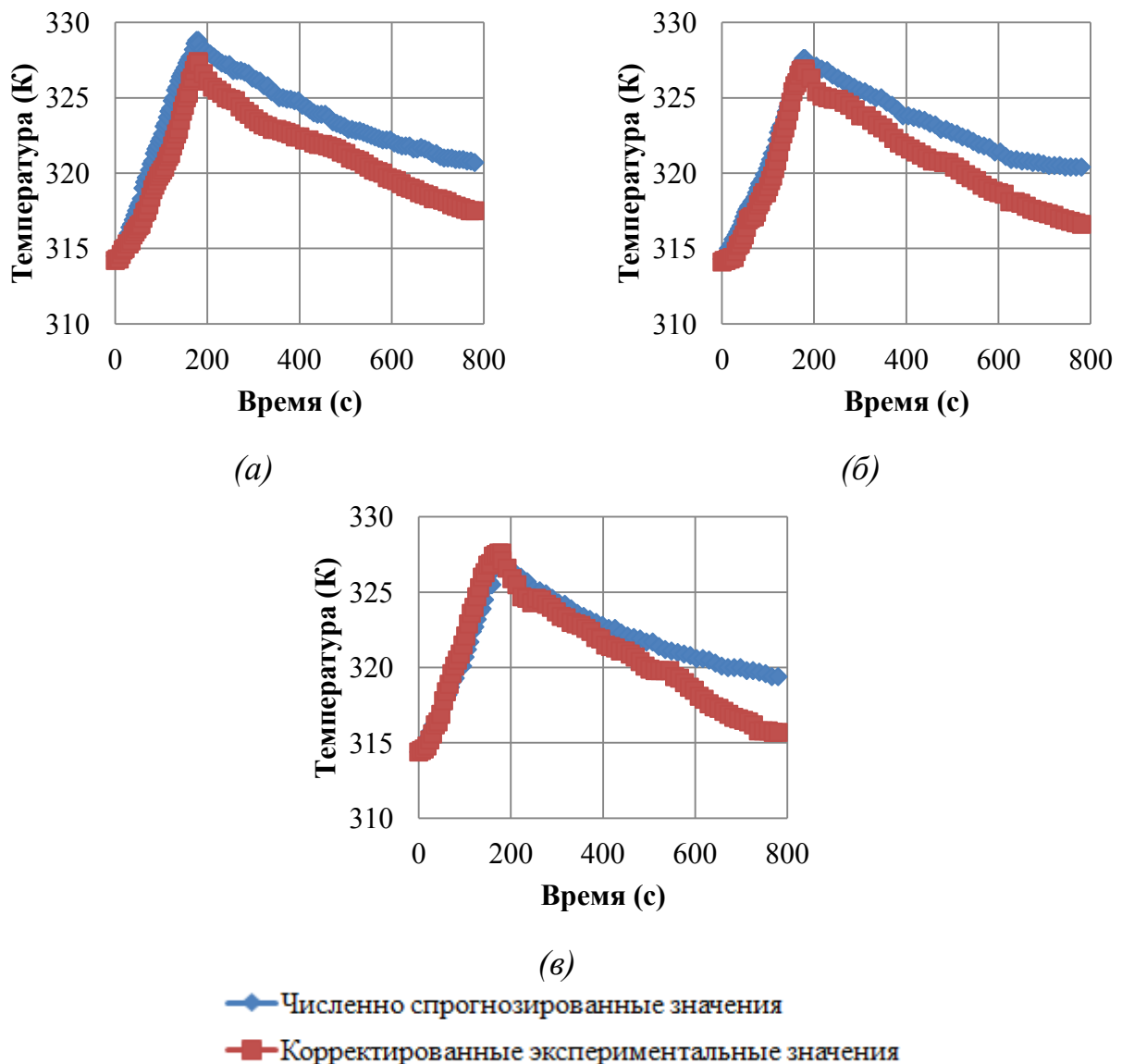


Рисунок 4.20 - Сравнение скорректированных экспериментальных и численно спрогнозированных временно-температурных изменений при $T_{нач} = 313,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (a) близ верхнего края камеры, (b) посередине, (v) близ нижнего края камеры с водой

Различие появляется только в случае повышения начальных температур, т.к. разница между температурой добавленной воды (которая была комнатной температуры) и температурой воды в камере является большей в случае повышенных начальных температур. Таким образом, было установлено, что чем выше температура и больше разница, тем большее несогласование между температурами, как можно увидеть на рис. 4.21.

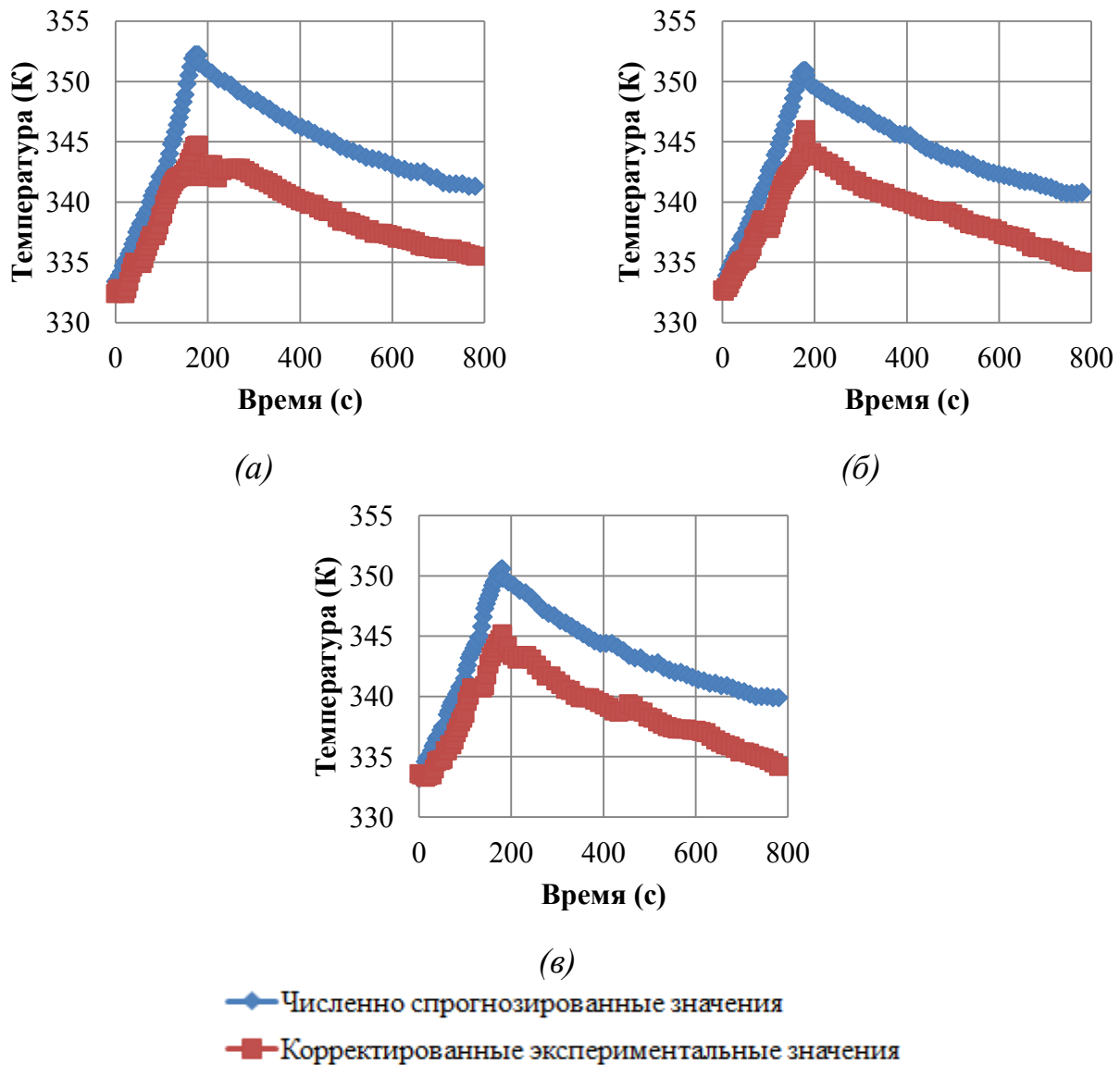
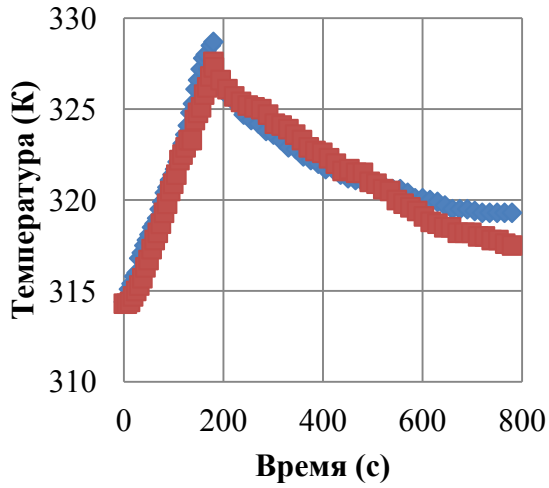


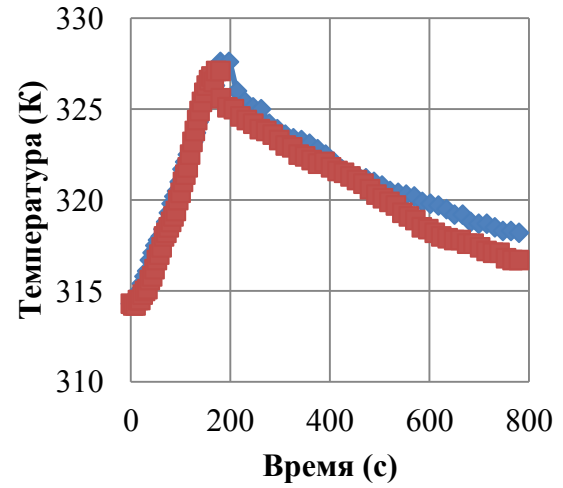
Рисунок 4.21 - Сравнение скорректированных экспериментальных и численно представленных временно- температурных изменений при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (a) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

***Корректировка температуры из-за добавления воды
при нагнетании давления***

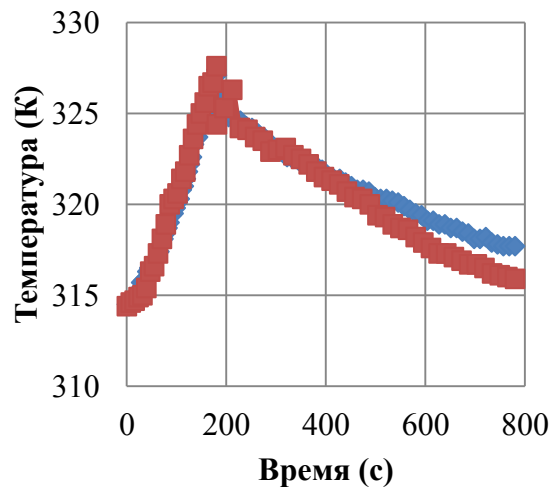
Несоответствие между численно спрогнозированными данными и данными эксперимента при повышенной начальной температуре можно объяснить тем фактом, что добавленная в систему вода для компенсации уменьшения объема из-за сжатия подается в систему при значительно низшей температуре, чем вода в камере. Как уже говорилось в подразделе 2.2.9, была введена поправка простого баланса энтальпий для численно спрогнозированной температуры с целью учета добавления воды через верхнюю заглушку. На рис. 4.22 и рис. 4.23 изображено сравнение между скорректированными численно представленными и скорректированными экспериментальными данными при $T_{нач} = 313,15 \text{ К}$ и $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$. Было выявлено лучшее соответствие между экспериментальными данными и численно спрогнозированными данными для обоих случаев.



(a)



(б)



(в)

◆ — Корректированные численно спрогнозированные значения
■ — Корректированные экспериментальные значения

Рисунок 4.22 - Сравнение скорректированного экспериментального и скорректированного численно спрогнозированного временно-температурного изменения при $T_{нач} = 313,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (a) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

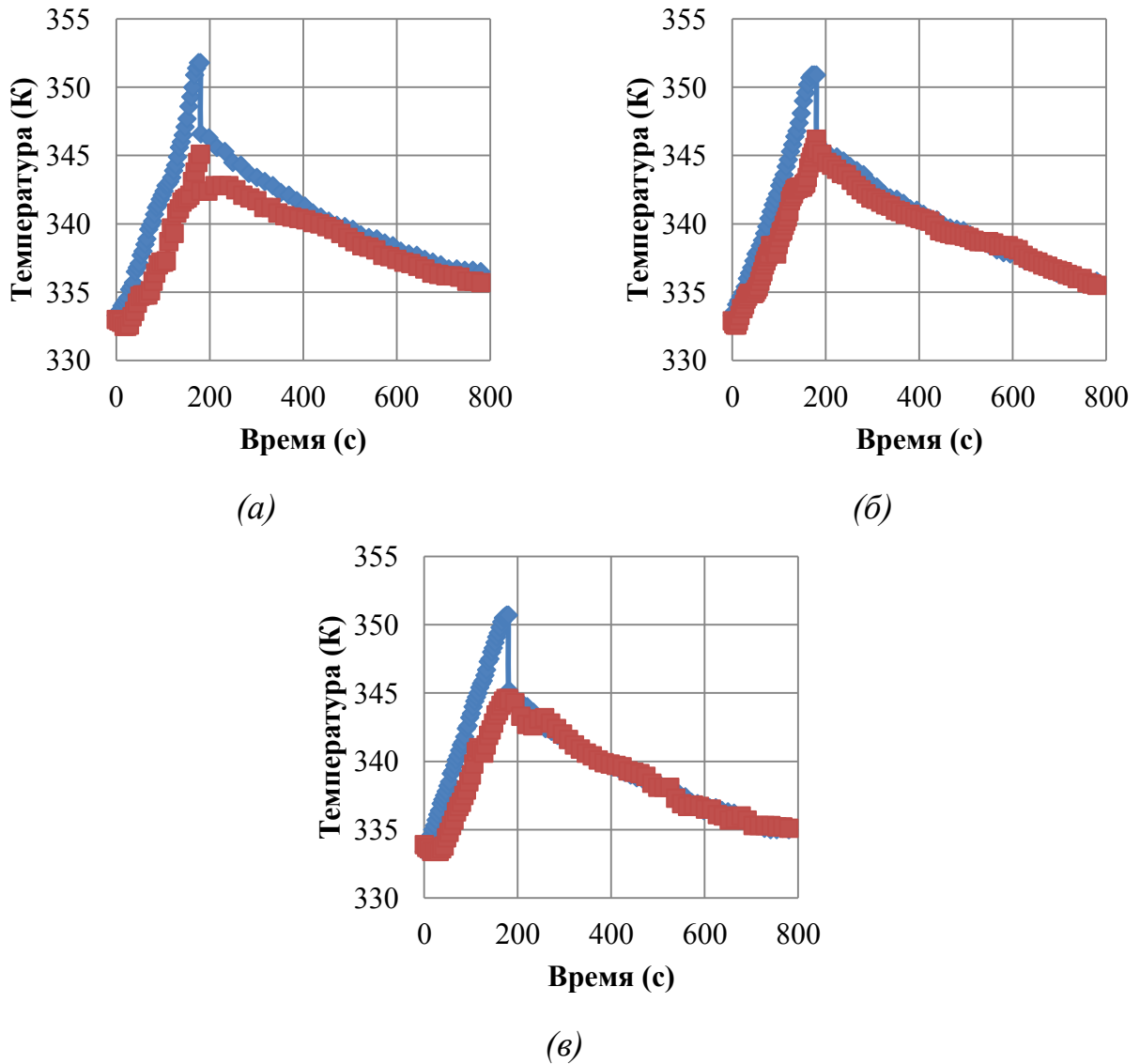


Рисунок 4.23 - Сравнение скорректированного экспериментального и скорректированного численно спрогнозированного временно-температурного изменения при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термопары, расположенной (а) близ верхнего края камеры, (б) посередине, (в) близ нижнего края камеры с водой

Несмотря на то, что был применен упрощенный подход для учета влияния добавленной воды, полученные результаты были удовлетворительными.

Влияние высокой начальной температуры на аксиальное и поперечное распределение температуры

Программа математического моделирования была использована для исследования влияния повышенной начальной температуры на распределение температуры в камере. Моделирование было выполнено при четырех различных начальных температурах с повышением давления на протяжении 180 с до 586 МПа и временем выдержки 600 с. Результаты моделирования показали, что с повышением начальной температуры, различие между максимальной и минимальной температурами в столбе жидкости увеличивается и достигает своего пика приблизительно посреди периода выдержки, как представлено в таблице 4.1. В столбе жидкости температура была максимальной вверху и минимальной – на дне, что вполне логично: горячая жидкость поднимается вследствие конвекционных потоков.

Таблица 4.1

Различие (в К) между максимальной (близ верхнего края) и минимальной (близ нижнего края) температурой в воде.

Начальная температура (К)	В конце нагнетания давления (180 с)	В период выдержки (после 480 с)	В конце периода выдержки (после 780 с)
298,15	≈ 5	≈ 8	≈ 6
313,15	≈ 7	≈ 8	≈ 6
333,15	≈ 7	≈ 8	≈ 7
353,15	≈ 8	≈ 11	≈ 10

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 (рис. 4.6). 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. Установлено, что профили безразмерной температуры вдоль оси камеры в столбе жидкости (рис. 4.24) при разных начальных температурах были подобны и вдоль радиального расстояния на горизонтальной средней плоскости в воде (рис. 4.25). Радиальное распределение температуры было однородным по большей части области, кроме участков близ стенок, и на него не влияет начальная температура.

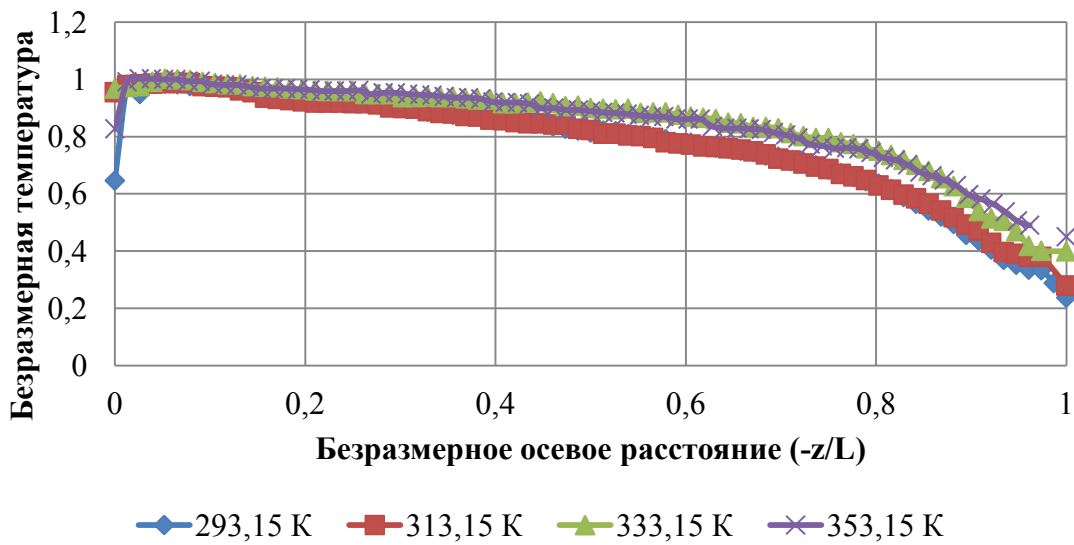


Рисунок 4.24 - Численно спрогнозированный безразмерный температурный профиль вдоль вертикальной оси, при разных значениях $T_{нач}$

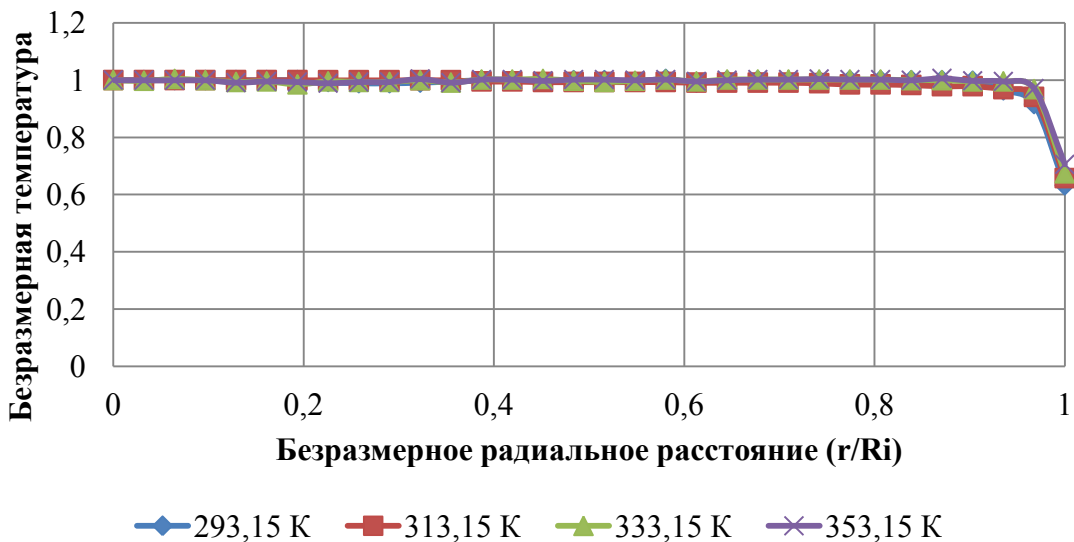


Рисунок 4.25 - Численно спрогнозированный профиль безразмерной температуры вдоль радиального расстояния в воде в горизонтальной средней плоскости, при разных значениях $T_{нач}$

Влияние размера камеры на распределение температуры

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. 4.26 (а) в конце нагнетания давления и на рис. 4.26 (б) в конце периода выдержки для трех разных размеров камеры: высота была одинаковая, изменялся лишь внутренний радиус ($2R_i$, R_i и $0,5R_i$). С целью исключительно математического моделирования толщина стенки камеры не изменялась. Радиальное расстояние было приведено к безразмерной величине по отношению к aR_i , где a – имеет значение 2, 1 и 0,5.

Как видно из рис. 4.26 (а) и рис. 4.26 (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 $2R_i$ 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 делать распределение температуры более однородным в сравнении с соответствующим случаем лишь конвекции, которая является очевидным из рис. 4.26.

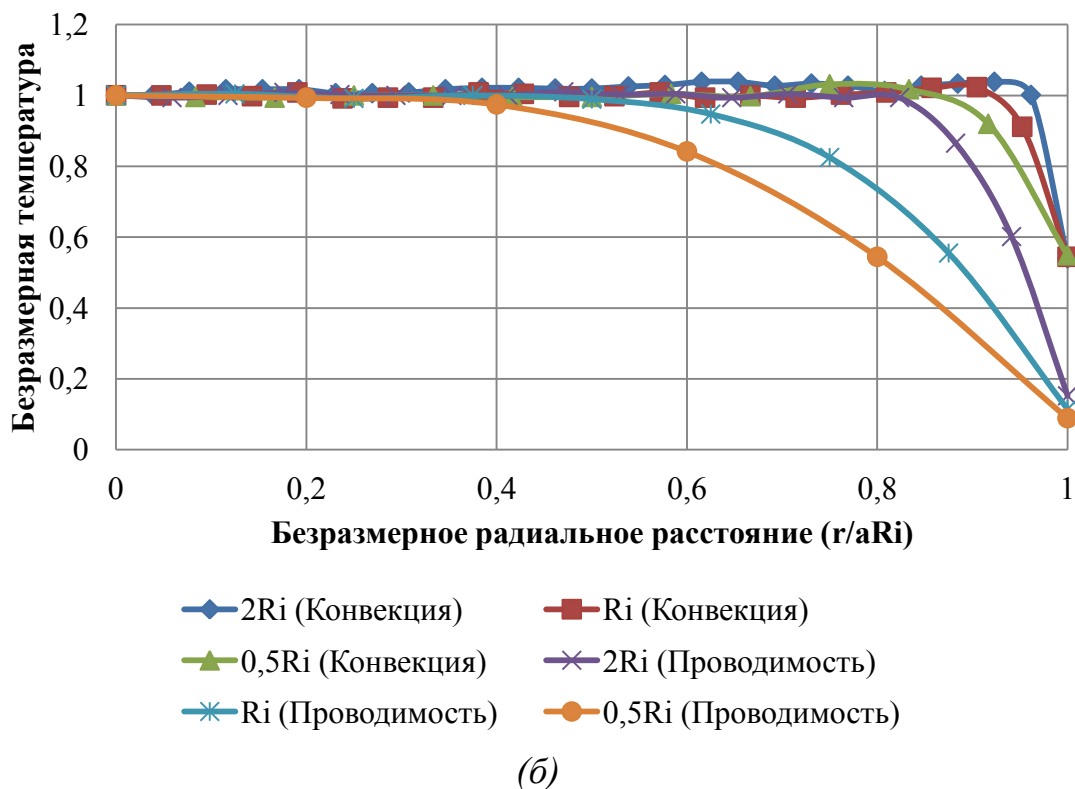
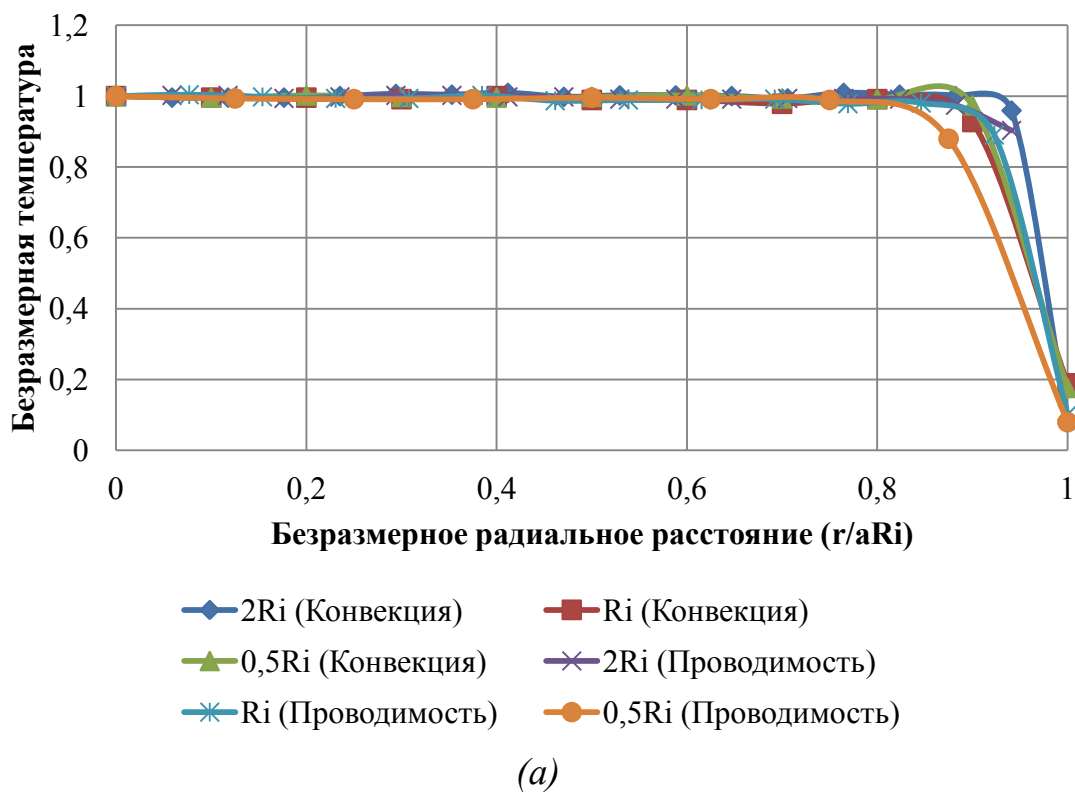


Рисунок 4.26 - Численно прогнозируемое безразмерное изменение температуры вдоль горизонтальной средней плоскости для камер с разным внутренним радиусом в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) период выдержки (780 с) только для проводимости и сопряженной теплопередачи

4.3 Влияние термоизолирующей вставки на распределение температуры

Из результатов, представленных в предыдущем разделе, становятся очевидным, что одной из причин неоднородности температуры во время обработки ВД давлением является теплопотери на толстой металлической стенке камеры. Одним из способов уменьшить теплопотери может служить установка термоизолирующей вставки в камеру.

Численно полученные результаты для комнатной температуры (293,15 К)

Конечно-элементная сетка была сгенерирована для случая с использованием термоизолирующей вставки толщиной 6,75 мм. Внешний диаметр вставки равен внутреннему диаметру камеры. Была создана грубая сетка, основанная на градиентах скорости, которые возникают во время обработки, сетка приблизительно 8 раз была очищена в программе ANSYS *Fluent*.

Численно полученные изотермы в воде оказались более однородными в сравнении со случаем, проведенным без вставки, после нагнетания давления и периода выдержки (рис. 4.27, 4.28). Была установлена в конце периода выдержки максимальная температура в камере с изоляцией – 308 К, против 299 К без вставки. Таким образом, можно утверждать, что установка термоизоляционной вставки в камере снижает теплопотери на стенку и, соответственно, приводит к меньшему изменению температуры в жидкости (воде).

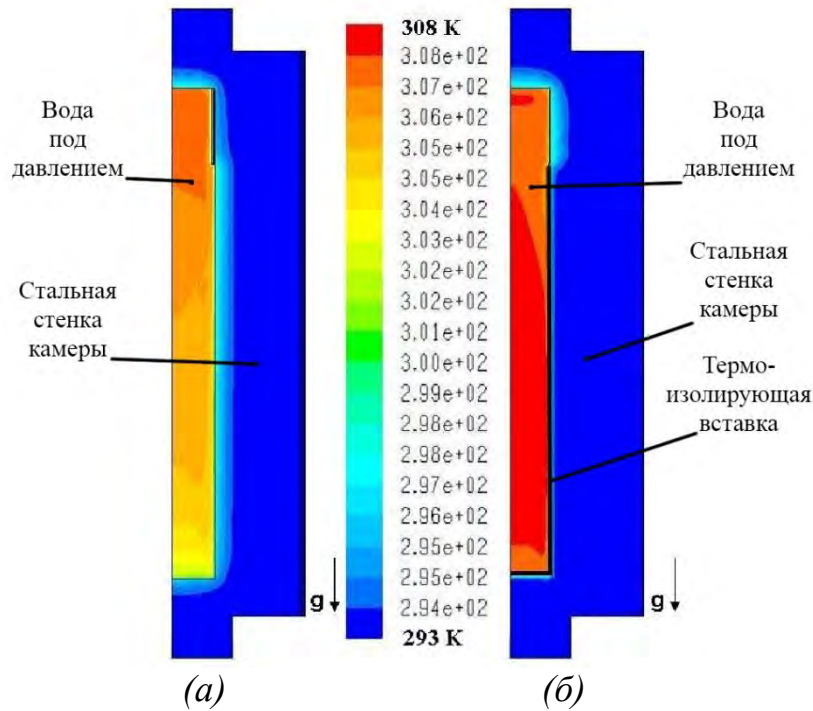


Рисунок 4.27 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 293,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце нагнетания давления (180 с), (а) без термоизоляционной вставки, (б) с термоизоляционной вставкой толщиной 6,75 мм

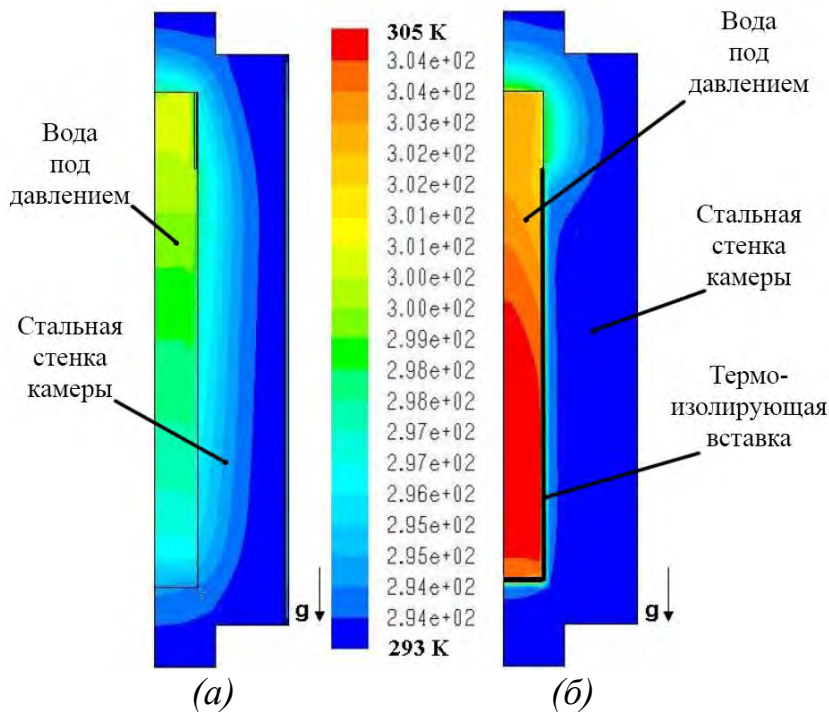


Рисунок 4.28 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 293,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце периода выдержки под давлением (780 с), (а) без термоизоляционной вставки, (б) с термоизоляционной вставкой толщиной 6,75 мм

Численно полученные результаты для высокой начальной температуры (333,15 К) с термоизоляционной вставкой

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 разной толщины (3,175 мм и 12 мм). Полученные результаты сравнивались для случая использования и неиспользования термоизоляции при 60°C (333,15 К). На рис. 4.29 и рис. 4.30 изображены изотермы в конце нагнетания давления (180 с) и в конце выдержки (780 с) соответственно. Как можно увидеть (рис. 4.29), 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. 4.30) 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 изоляции по отношению к технологическим требованиям.

Направления потоков в конце периода выдержки для случаев с и без использования термоизоляции представлены на рис. 4.31.

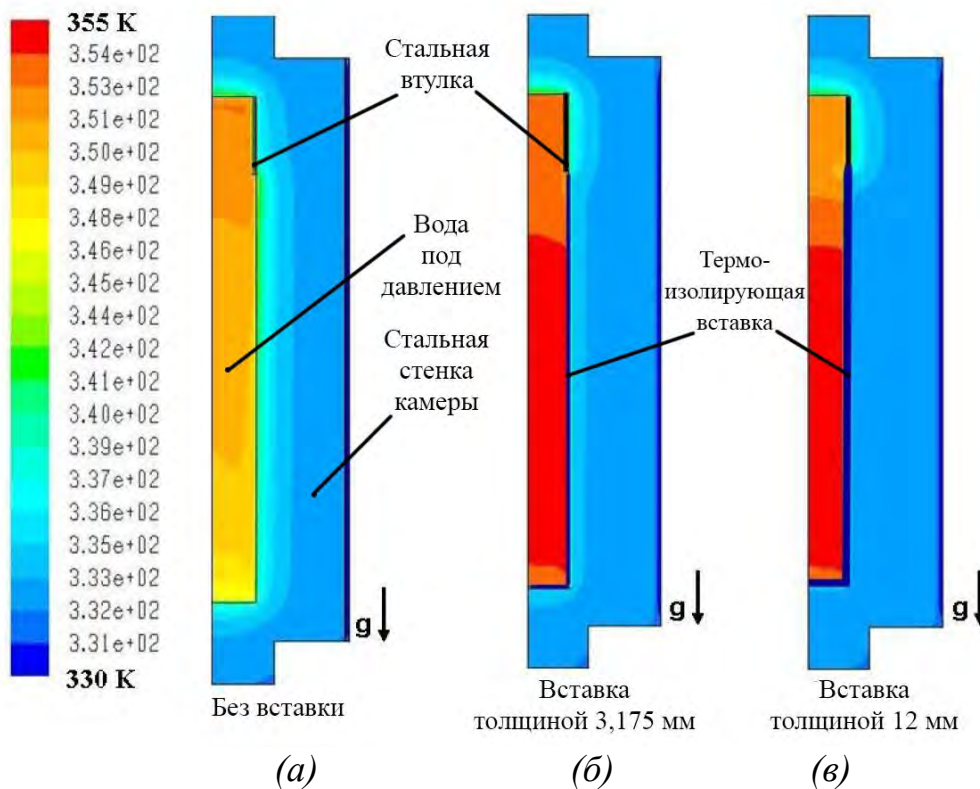


Рисунок 4.29 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$,

$P = 586 \text{ МПа}$, для термоизоляции разных толщин в конце нагнетания давления

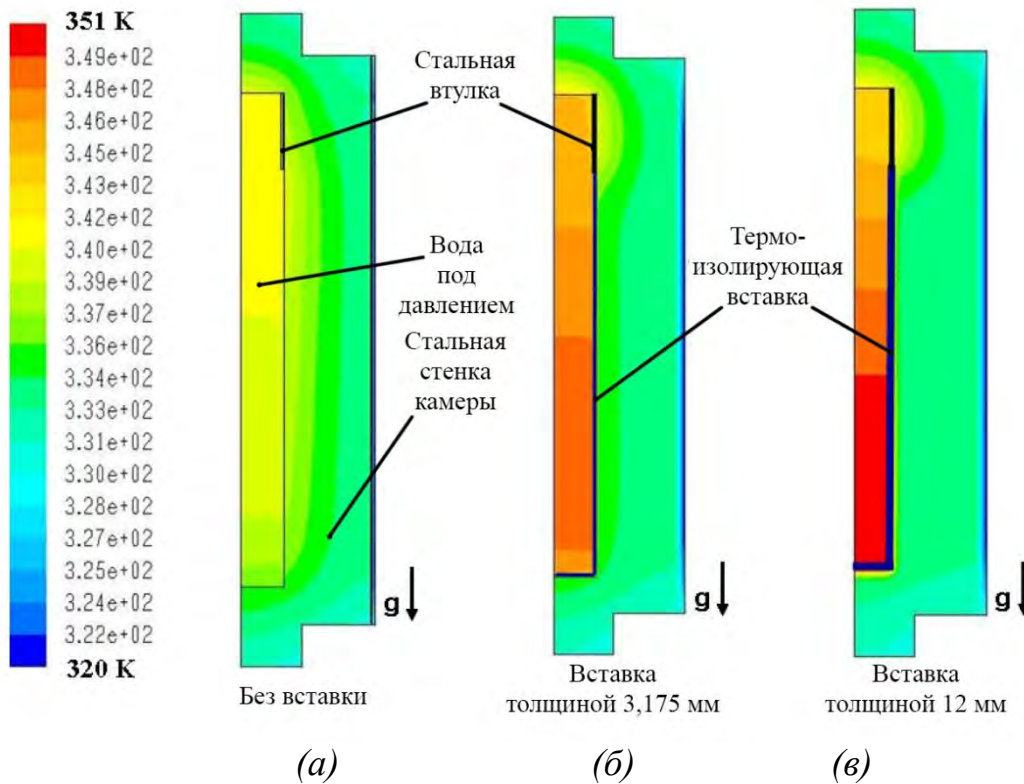


Рисунок 4.30 - Изотермы в воде и стенке $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$, $P = 586 \text{ МПа}$, для

термоизоляции разных толщин в конце периода выдержки (780 с)

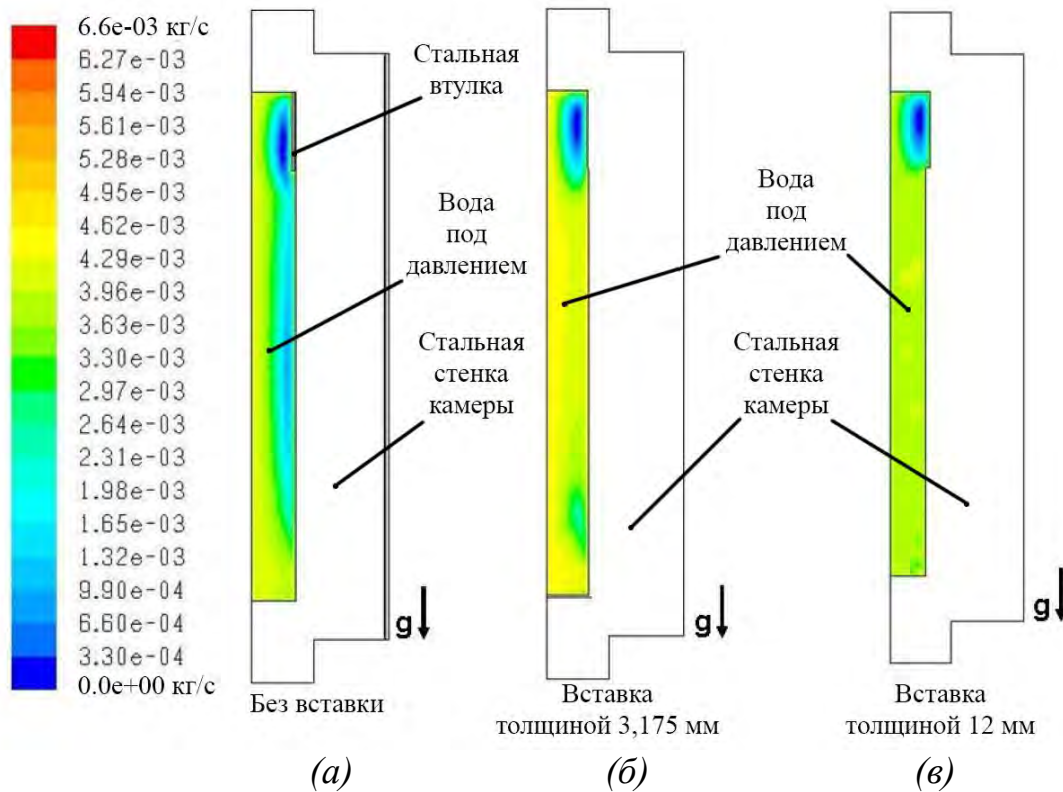


Рисунок 4.31 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, для термоизоляции разных толщин в конце периода выдержки (780 с)

Для лучшего понимания распределения температуры с использованием термоизоляционной вставки в камере, были построены графики профилей безразмерной температуры вдоль радиальной и аксиальной плоскостей (см. рис. 4.6). Температура была переведена в безразмерную 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. 4.32 и рис. 4.33 изображены профили безразмерной температуры на радиальной и аксиальной плоскостях соответственно. Как видно, установка термоизоляционной вставки не оказывает значительного влияния на радиальное распределение температуры (рис. 4.32), тогда как аксиальное распределение становится более однородным в сравнении со случаем, когда изоляции нет (рис. 4.33).

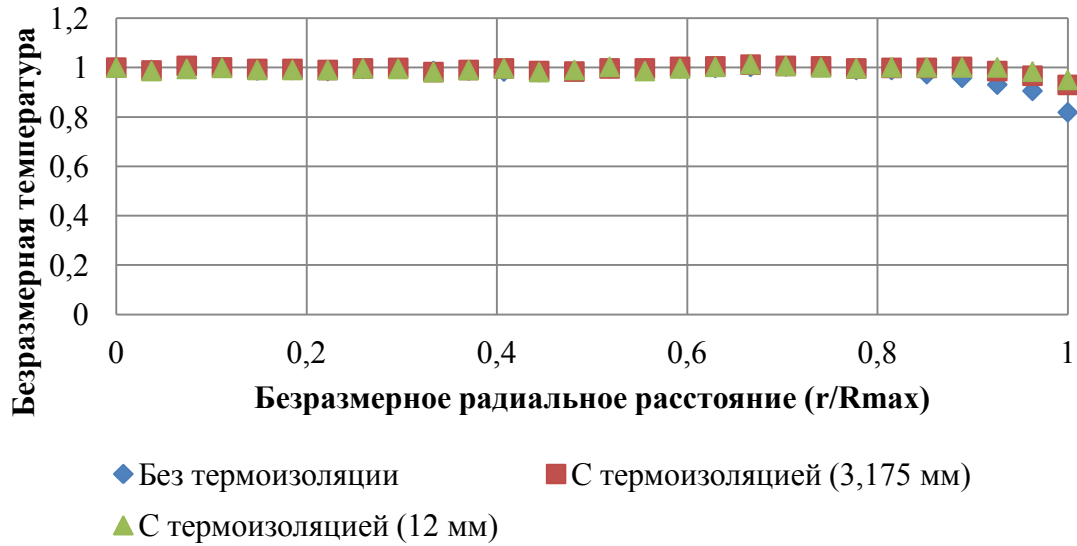


Рисунок 4.32 - Численно полученные профили безразмерной температуры вдоль радиального расстояния в воде по горизонтальной средней плоскости в конце периода выдержки (780 с)

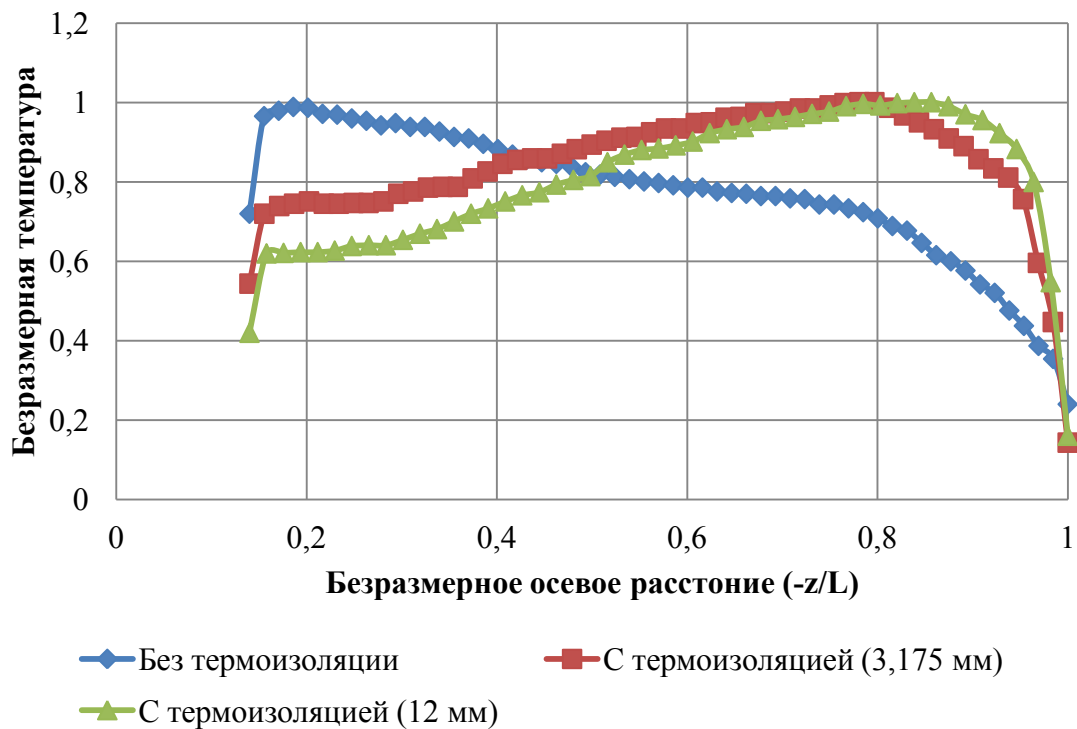


Рисунок 4.33 - Численно полученные профили безразмерной температуры вдоль аксиального расстояния в воде по вертикальной плоскости в конце периода выдержки под давлением (780 с)

4.4 Влияние изменения свойств воды

Термофизические свойства, такие как плотность, теплоемкость, теплопроводность, вязкость и коэффициент теплового расширения воды являются функциями как температуры, так и давления. Как видно из результатов, представленных в предыдущих разделах, использованные свойства выступали в функции лишь температуры, то есть зависимость свойств от давления не учитывалась. Далее представлены результаты моделирования, выполненного при температуре 60°C, с учетом влияния давления на физические свойства.

Чтобы проиллюстрировать важность изменения в физических свойствах под давлением, предоставлены результаты для двух случаев: когда влияние давления и температуры учитывалось лишь для теплопроводности воды и когда влияние давления и температуры учитывалось для плотности, теплоемкости и теплопроводности воды. Значения вязкости и коэффициента теплового расширения при 60°C оставались без изменения, когда давление повышалось от 0,1 МПа до 586 МПа.

Влияние изменения лишь теплопроводности воды

При повышенном давлении теплопроводность воды выше, чем при атмосферном давлении. Теплопроводность воды также повышается с увеличением температуры. Для оценки влияния изменения теплопроводности воды на прогнозируемое распределение температуры, численное моделирование проводилось при начальной температуре 60°C (333,15 К) и выдержке под давлением в 586 МПа. Из-за комбинированного влияния давления и температуры, значение теплопроводности, использованное для моделирования, составляло 0,85 Вт/(мК) против 0,66 Вт/(мК), что было получено при использовании предварительно описанного случая при температуре 60°C. Значение теплопроводности воды при ВД и температуре

было получено из работы [65] при давлении 586 МПа и температуре 60°C. Значение плотности, удельной теплоемкости, вязкости и коэффициента теплового расширения воды были получены из работы [66] при температуре 60°C, зависимость этих свойств от давления не учитывалась.

На рис. 4.34 и рис. 4.35 изображены изотермы воды и стенки камеры, когда теплопроводность воды составляла 0,85 Вт/(мК) и 0,66 Вт/(мК) соответственно. На рис. 4.36 и рис. 4.37 представлены соответствующие направления потоков в воде.

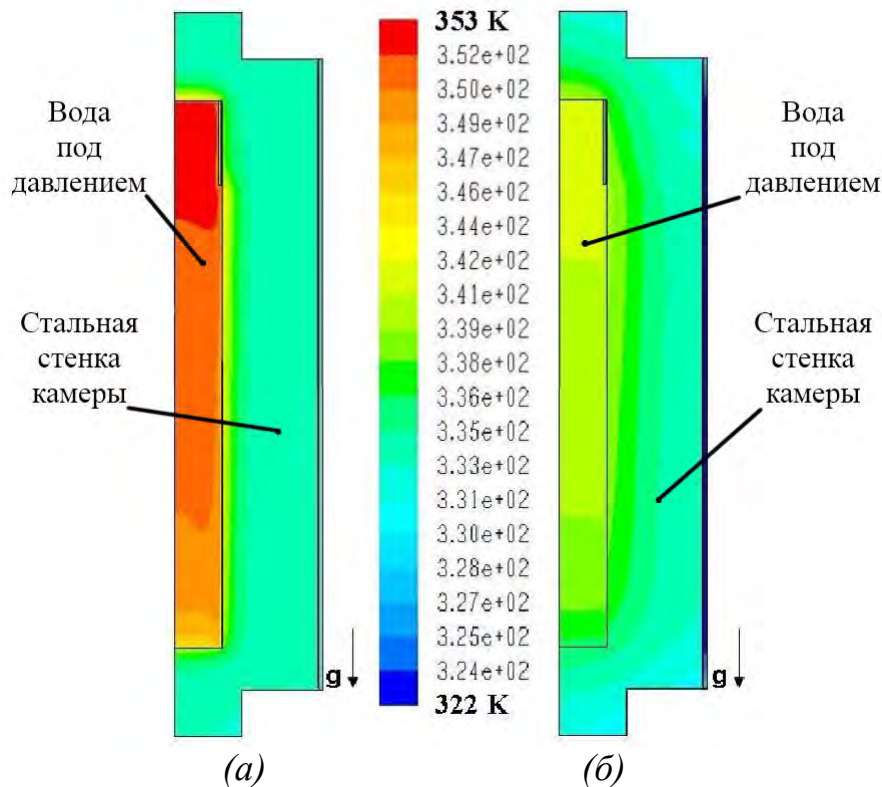


Рисунок 4.34 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с), когда теплопроводность зависела от давления и температуры

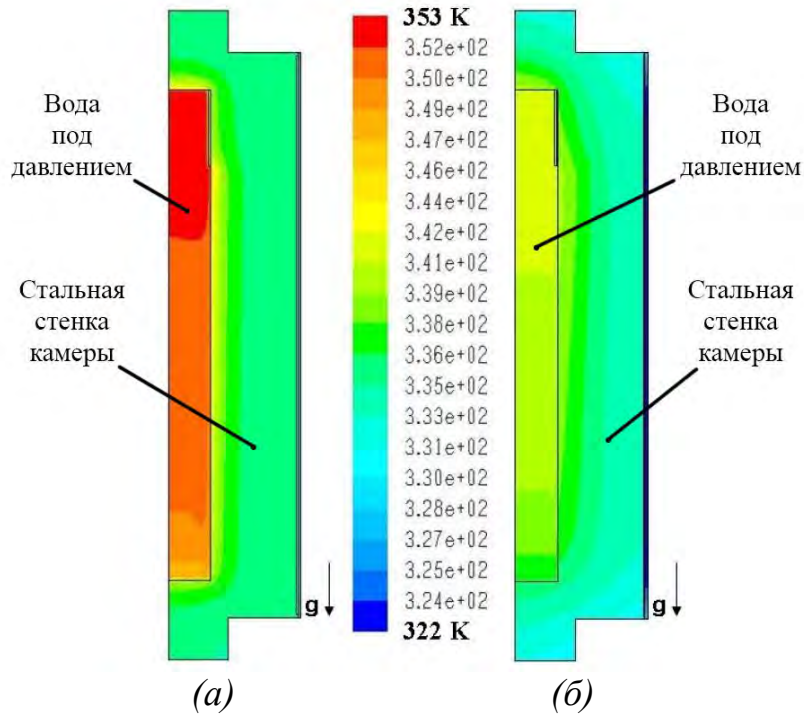


Рисунок 4.35 - Изотермы в воде и стенке камеры $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с), когда теплопроводность зависела лишь от температуры

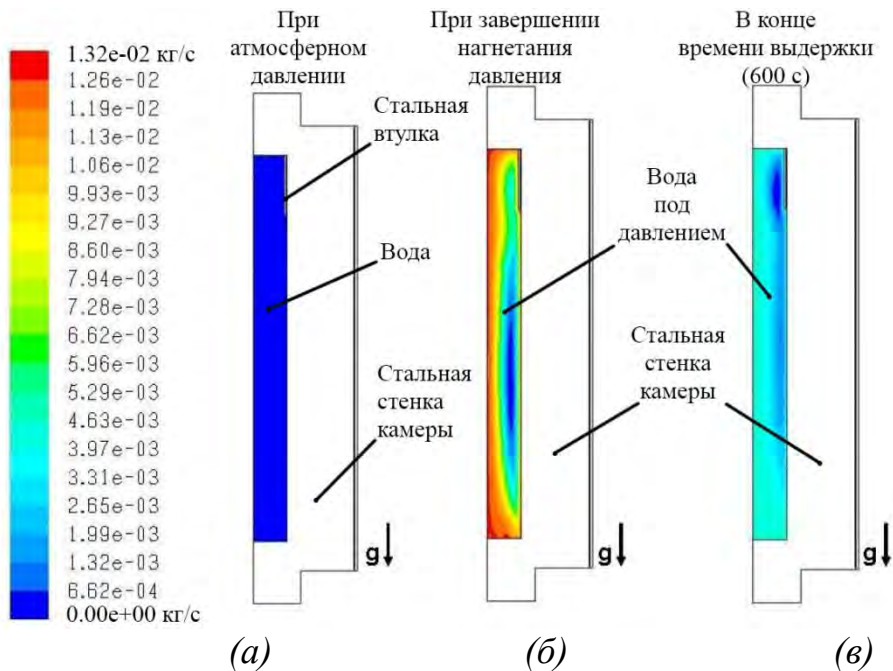


Рисунок 4.36 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) в конце этапа выдержки (780 с), когда теплопроводность зависела от давления и температуры

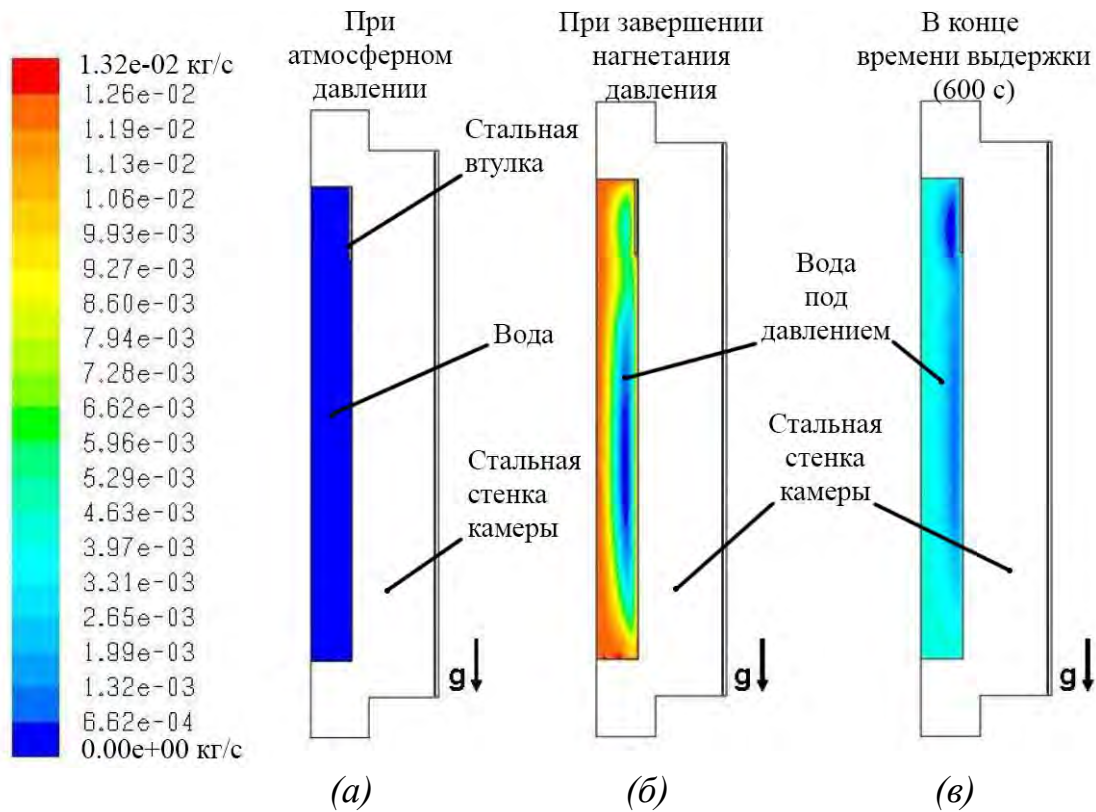


Рисунок 4.37 - Направление потока в воде при $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$, $P = 586 \text{ МПа}$, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) в конце этапа выдержки (780 с), когда теплопроводность зависит только от температуры

Никаких значительных изменений не наблюдалось между случаями, когда теплопроводность зависела от температуры и давления и когда она зависела лишь от температуры. Повышение температуры в конце нагнетания давления и изменение температуры в конце периода выдержки оказались довольно близкими для обоих случаев. Значение массовых затрат воды по направлениям потоков почти не отличалось.

Влияние изменения теплопроводности, плотности и теплоемкости

Как уже было указано в предыдущем разделе, повышение давления и температуры приводит к увеличению теплопроводности воды. Аналогично, с повышением давления увеличивается плотность воды, поскольку теплоемкость

воды уменьшается. Для оценки влияния одновременного изменения теплопроводности, плотности и теплоемкости воды на прогнозируемое распределение температуры, численное моделирование проводилось при начальной температуре 60°C ($333,15\text{ K}$) и давлении 586 МПа . Свойства, которые были использованы для этого моделирования: теплопроводность – $0,85\text{ Вт/(мК)}$ вместо $0,66\text{ Вт/(мК)}$ (как было определено в базе материалов *ANSYS Fluent*), плотность – 1150 кг/м^3 вместо $983,2\text{ кг/м}^3$ и теплоемкость – 3750 Дж/(кгК) вместо 4181 Дж/(кгК) . Значение теплопроводности, плотности и теплоемкости воды при ВД и температуре были получены из работы [65] при давлении 586 МПа и температуре 60°C .

На рис. 4.38 и 4.39 изображены изотермы в воде и стенке камеры, соответственно, с влиянием и без влияния давления на теплопроводность, плотность и теплоемкость воды. На рис. 4.40 и 4.41 представлены соответствующие направления потоков в воде. Различие в температуре для двух случаев составляло приблизительно 1 K .

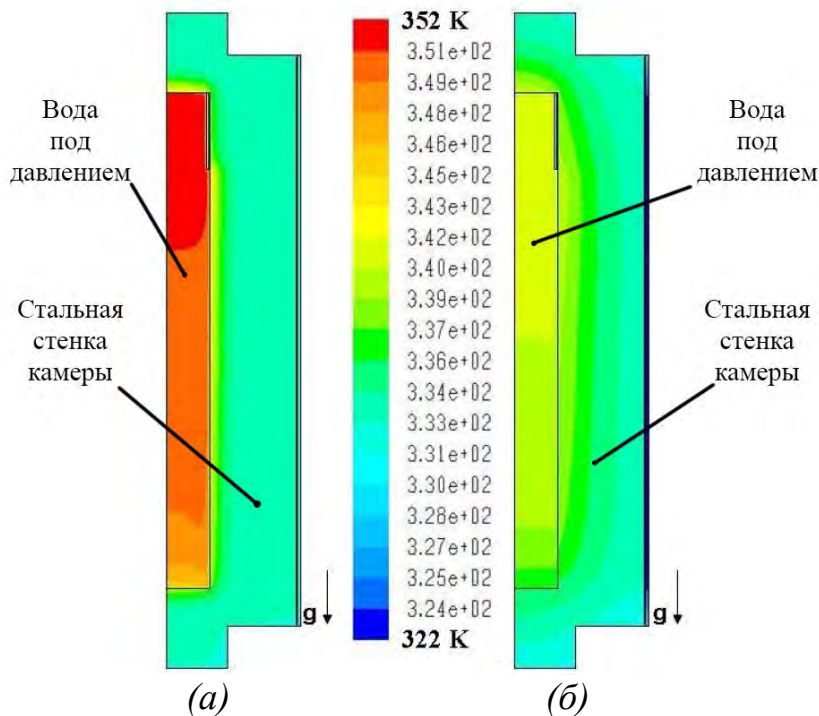


Рисунок 4.38 - Изотермы в воде и стенке из камеры при $T_{нач} = 333,15\text{ K}$, $P = 586\text{ МПа}$, в конце (а) нагнетания давления (180 с), (б) этапа выдержки (780 с), когда термofизические свойства зависели от давления и температуры

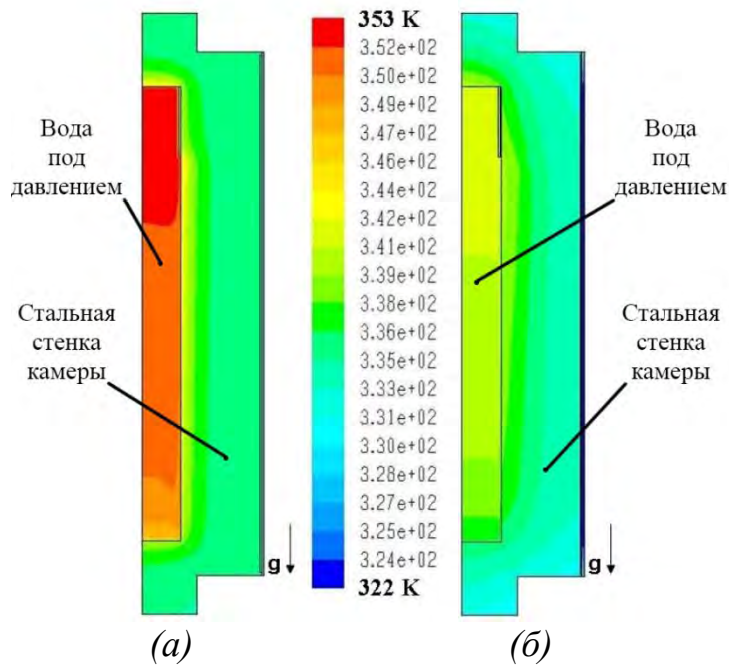


Рисунок 4.39 - Изотермы в воде и стенке камеры при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, в конце (а)нагнетания давления (180 с), (б) периода выдержки (780 с), когда теплофизические свойства зависели только от температуры.

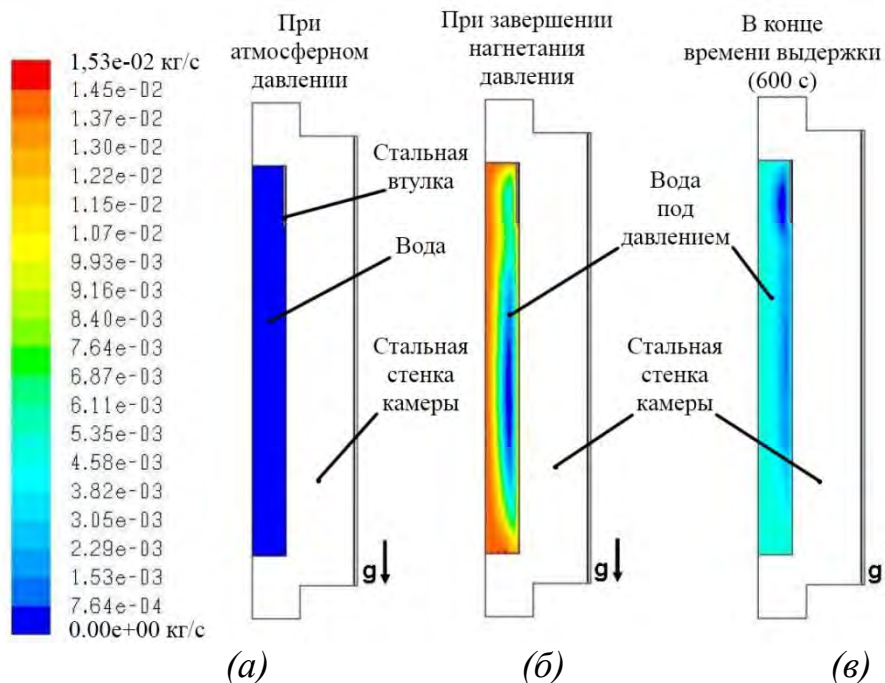


Рисунок 4.40 - Направления потоков в воде при $T_{нач} = 333,15$ К, $P = 586$ МПа, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) этапа выдержки (780 с), когда термофизические свойства зависели от давления и температуры

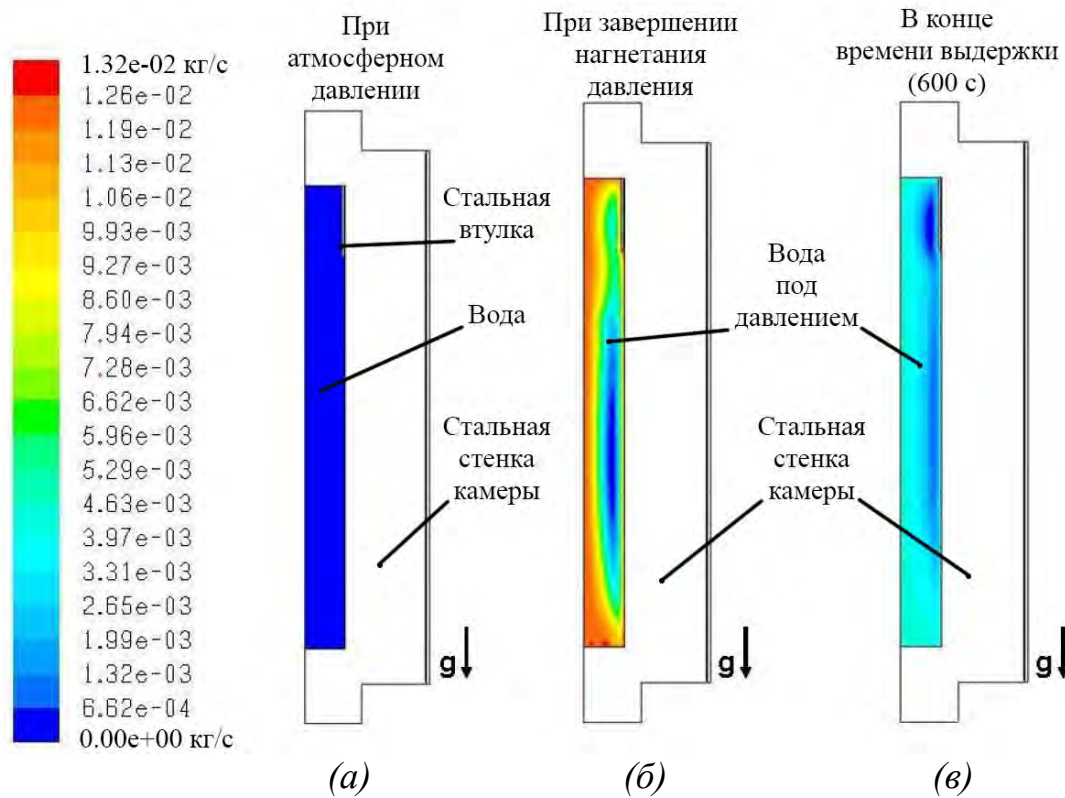


Рисунок 4.41 - Линии тока воды при $T_{нач} = 333,15 \text{ К}$, $P = 586 \text{ МПа}$, (а) при атмосферном давлении, (б) в конце нагнетания давления (180 с) и (в) в конце периода выдержки (780 с), когда использовались теплофизические свойства зависящие только от температуры

4.5 Выводы по разделу

1. Выполнено численное моделирование распределения температуры внутри камеры для обработки продуктов питания высоким гидростатическим 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. 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.

5. Полученная математическая модель подтвердила гипотезу о том, что увеличение размера камеры и установка термоизолирующей вставки может уменьшить неоднородность температуры в нагнетательной среде.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено численное моделирование распределения температуры внутри камеры для обработки продуктов питания высоким гидростатическим 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сукманов, В. А. Сверхвысокое давление в пищевых технологиях: состояние проблемы / Сукманов В. А., Хазипов В. ; Донец. гос. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк : Изд-во ДонГУЭТ, 2003г. - 168 с.
2. Van Eldik R. High Pressure Chemistry. Synthetic, Mechanistic, and Supercritical Applications / R. van Eldik, F.-G. Klärner – Wiley-VCH, Weinheim, 2008. – 474 p. – ISBN: 978-3-527-61263-5
3. Гоникберг, М. Г. Химическое равновесие и скорость реакции при высоких давлениях / Гоникберг М. Г. – М. : Химия, 1969. – 427 с.
4. Hoover, D. G. Pressure effects on biological systems // Food Technology. – 1993. – Vol. 47, № 6. – P. 150-155.
5. Effects of high pressure on vegetative pathogens / Patterson M. F. [et al.] // High Pressure Processing of Foods / ed.: Ledward D. A. [et al.]. - Nottingham, 1995. - P. 47-64.
6. Бриджмен, П. В. Физика высоких давлений / Бриджмен П. В. [и др.] - М. : ОНТИ, 1935. – 211 с.
7. Бриджмен, П. В. Новейшие исследования при высоких давлениях / Бриджмен П. В. – М. : ОНТИ, 1948. – 299 с.
8. Горбатов, А. В. Влияние давления, влажности и температуры на структурно-механические свойства фарша / А. В. Горбатов, В. Д. Косой // Изв. вузов. Пищ. технология. - 1970. – № 2. – С. 146-151.
9. Циклис, Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д. С. Циклис. - М. : Химия, 1965. – 190 с.
10. Т. Туменов, С. Н. Экспериментальный стенд для исследования компрессионных свойств мяса и мясопродуктов / С. Н. Туменов, А. В. Ионов, Б. М. Жакайбеков // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических

- процессов пищевых производств : тез. докл. [конф.], 1-4 нояб. 1990 г. / Гос. ком. СССР по науке и технике [и др.]. – М., 1990. – С. 248.
11. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств : пер. с англ. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. - 384 с.
 12. Исследование физических свойств мяса, обработанного высоким давлением / С. Н. Туменов [и др.] // Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающие отрасли АПК : респ. науч.-техн. конф. : тез. докл. / Киев. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Киев, 1991. – С. 59.
 13. Гаркуша, В.Б. Разработка и исследование установки для обработки продуктов питания сверхвысоким давлением : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Гаркуша В. Б. – Донецк, 2002. – 203 с.
 14. Дослідження впливу високого тиску на фізико-хімічні та біохімічні властивості печінкових паштетів / Сукманов В. О., Соколов С. А., Севаторов М. М., Приходько І. В. // Зб. наук. пр. Луган. нац. аграр. ун-ту. Сер. Техн. науки. – Луганськ, 2005. – Вип. 49. - С. 262-267.
 15. Оптимизация параметров обработки продуктов питания сверхвысоким давлением / Шаталов В. М., Сукманов В. А., Соколов С. А., Нога И. В., Жданов И. В., Волкова А. В. // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона : межведомств. сб. науч. работ / Донец. нац. ун-т. - Донецк, 2003. - № 3. - С. 238-247.
 16. Сохранение витамина С в процессах пастеризации продуктов питания сверхвысоким давлением / Шаталов В. М. [и др.] // Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини : зб. тез I міжнар. і міжгалуз. наук.-практ. конф., (8-9 квіт. 2005 р.) / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2005. – С. 249-251.
 17. Шаталов, В. М. Теоретическая модель воздействия сверхвысоких давлений в технологии производства продуктов питания / Шаталов В.

- М., Сукманов В. А., Соколов С. А. // Управление развитием сложных систем [Электронный ресурс] / Ассоц. развития образоват. и науч. сетей. – Электрон. журн. – [Донецк], сор. 2003. – Режим доступа: http://www.desa.donbass.com/html_rus/conferences/mcsd-03/fundament_2.htm. - Загл. с экрана.
18. Сукманов, В. Высокое давление – инновационные технологии 21 века в пищевых технологиях / В. Сукманов, Ю. Петрова, С. Соколов // 15th International Conference on control, development and applied informatics in business and economics (CDAIBE`08), Brasov, Romania, 10-12 Nov. 2008. – Brasov, 2008. - P. 351-366
 19. Высокое давление – инновационные технологии 21 века в пищевых технологиях / V. Sukmanov, J. Petrova, S. Sokolov, O. Dekan. - Bucharest : Editura Didactica si Pedagogica, 2008. – 25 p
 20. Експериментальні дослідження впливу надвисокого тиску на стійкість пива / Соколов С. А., Афенченко Д. С., Шульга А. В., Дебелий В. Л. // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – Донецьк, 2003. – Вип. 8. – С. 172–177.
 21. Жаксылыкова М.О. Качественные показатели мяса при воздействии высокого гидростатического давления: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.18.04. – Москва, 1994. – 19 с.
 22. Туменев С.Н. Обработка мясных продуктов давлением: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.18.04. – Москва, 1993. – 48 с.
 23. Denys, S. A Modeling approach for evaluating process uniformity during batch high hydrostatic pressure processing: combination of a numerical heat transfer model and enzyme inactivation kinetics / S.Denys, A. M. van Loey, M. E. Hendrickx // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2000. – Vol. 1, № 1. – P. 5–19.
 24. Hartmann, C. Numerical simulation of convective and diffusive transport effects on a high-pressure-induced inactivation process / C. Hartmann, A.

- Delgado // *Biotechnology and Bioengineering*. – 2002. – Vol. 79, № 1. – P. 94–104.
25. Kowalczyk, W. Dimensional analysis of thermo-fluid-dynamics of high hydrostatic pressure processes with phase transition / W. Kowalczyk, A. Delgado // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 3007–3018.
26. Kowalczyk, W. Modelling and numerical simulation of convection driven high pressureinduced phase changes / W. Kowalczyk, C. Hartmann, A. Delgado // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47, № 5. – P.1079–1089.
27. Rauh, C. Analysis of inhomogeneous thermofluid-dynamical processes in short time high pressure treatment of liquid foods / C. Rauh, A. Baars, A. Delgado // *Proceedings of the 4th International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology*, Tsukuba, Japan. – [S. l.], 2006. – P. 186–191.
28. Нога, И. В. Моделирование воздействия давления и температуры в процессах стерилизации продуктов питания сверхвысоким давлением / Нога И. В., Шаталов В. М., Сукманов В. А. // I Українська наукова конференція "Проблеми біологічної і медичної фізики", 20-22 верес. 2004 р. / Харк. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна, Харк. держ. мед. ун-т. – Х., 2004. – С.197-197.
29. Hartmann, C. Numerical simulation of the mechanics of a yeast cell under high hydrostatic pressure / C. Hartmann, A. Delgado // *J. of Biomechanics*. – 2004. – Vol. 37, № 7. – P. 977–987
30. Delgado, A. Pressure Treatment of Food: Instantaneous but not Homogeneous Effect / A. Delgado, C. Hartmann // *Advances in high pressure Bioscience and Biotechnology* / Winter R. - Heidelberg, 2003. – P. 459–464.
31. Петрова Ю.Н. Совершенствование процесса и оборудования для стабилизации качества вишневого сока с использованием высокого

- давления [Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.18.12 / Петрова Ю. Н. ; Донецкий гос. ун-т экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. - Донецк, 2004. - 206 с.
32. Зотова И.А. Использование высокого давления для обработки яблочных выжимок с целью интенсификации процесса извлечения пектина [Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.18.12 / Зотова И.А. ; Донецкий нац. ун-т экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. - Донецк, 2012. - 202 с.
33. Севаторов М.М. Процес виробництва печінкових паштетів з використанням високого тиску: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.18.12 / М. М. Севаторов ; Донец. нац. ун-т екон. і торгівлі ім. М.Туган-Барановського. — Донецьк, 2010. — 20 с. - укр.
34. Кійко В.В. Товарознавча оцінка молока, обробленого високим тиском: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.18.15 / В.В. Кійко ; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М.Туган-Барановського. — Донецьк, 2009. — 20 с. — укр.
35. Декань О. О. Дослідницьке обладнання для комплексної обробки харчових продуктів високим тиском і ультразвуком: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / О. О. Декань ; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. — Донецьк, 2010. — 19 с. — укр.
36. Сабіров О.В. Технологія барооброблених цільном'язових м'ясних виробів зі свинини: автореф. дис.... канд. тех. наук: 05.18.16 / Олександр Володимирович Сабіров ; Донецький національний ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган- Барановського. — Донецьк, 2009. — 18 с. — укр.
37. Громов С.В. Процесс обработки сливочного масла высоким циклическим давлением: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.15.12 / Громов С.В. Донец. нац. ун-т економіки и торговли им. М. Туган - Барановского. – Донецк, 2019 - 24 с.
38. Пат. 83643 Украина; МПК А22С7/00. Спосіб виробництва ветчини

- 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Khurana M., Karwe M.V.: Parameters affecting the accuracy of temperature measurements during high hydrostatic pressure processing / M. Khurana, M.V. Karwe // J. of food process engineering/ - 2013. - Vol. 36, № 1. – P. 50-57.

43. Viscosity and Aggregation of β -Lactoglobulin under High Pressure / Baars A. [et al.] // Proceedings of the 4th International Symposium on Food Rheology and Structure. - Zürich, 2006. – P. 263–267.
44. Baars, A. Relations of diffusive momentum transport and conformational changes in aqueous beta-lactoglobulin solutions under high pressure / A. Baars, D. Marjanovic, A. Delgado // 3rd International Conferences on High Pressure Bioscience and Biotechnology, 27-30.09.2004, Rio de Janeiro, Brazil / ed.: J. A. Mignaco [et al.]. – [S. l.], 2005. – P. 48-54.
45. Bridgman, P. W. Water in the liquid and five solid forms under pressure // Proc. of the Amer. Acad. of Arts and Sciences. - 1912. – Vol. 47. – P. 439-558.
46. Hoover D.G.. 1989. Biological effects of high hydrostatic pressure on food microorganisms / Hoover D.G., Metrick C., Papineau A.M. [et al.] // Food Technology – 1989. March:– P. 99-107.
47. Knorr D. Novel approaches in food processing technology: new technologies for preserving foods and modifying function. // Current Opinion in Biotechnology – 1999. Vol. 10, № 5: – P. 485-491.
48. Knorr D. Impact of non-thermal processing on plant metabolites // Journal of Food Engineering – 2003., Vol. 56. – P. 131-134.
49. Rastogi N.K. Opportunities and challenges in high pressure processing of foods / N.K. Rastogi, K.S.M.S. Raghavarao, V.M. Balasubramaniam [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition – 2007, Vol. 47: – P. 69-112. - ISSN: 1040-8398
50. Farkas D.F. [Электронный ресурс]
URL: http://www.elmhurstresearch.com/hpp_history.htm
(дата обращения: 18.06.2016). –Text: electronic.
51. Hayashi R. High pressure in bioscience and biotechnology: pure science encompassed in pursuit of value, Biochimica et Biophysica Acta – 2002. Vol. 1595, – P. 397-399.
52. Hayakawa I.. Novel mechanical treatments of biomaterials / Hayakawa I.;

- Linko Y.; and Linko P. // *Lebensm-Wiss. U.-Technol.*– 1996. Vol. 29. – P. 395-403.
53. Suzuki A. High pressure-processed foods in Japan and the world. Trends in High Pressure Bioscience and Biotechnology / K. Heremans, R. Lange, A. Suzuki [et al.] // *Progress in Biotechnology* / Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. – 2002. Amsterdam, Netherlands.
54. Knorr D. Nutritional improvements of plant foods by non-thermal processing / D. Knorr, B.I.O. Ade-Omawaye and V. Heinz // *Proceedings of the Nutrition Society* – 2002. Vol. 61. – P. 311-318.
55. Butz P. Emerging technologies: Chemical aspects / P. Butz, B. Tauscher // *Food Research International* – 2002. Vol. 35. – P. 279-284.
56. Venugopal V. Seafood processing: adding value through quick freezing, retortable packaging, and cook-chilling / V. Venugopal. – CRC press, Florida-USA, 2006 – 335 p.
57. Lopez-Malo A. Minimally processed foods with high hydrostatic pressure / A.Lopez-Malo, E. Palou, G.V. Barbosa-Canovas [et al.] // *Trends in Food Engineering* - 2000. – P. 271.
58. Butz P. Influence of high hydrostatic pressure on aspartame: Instability at neutral pH. / A. Fernandez, H. Fister, B. Tauscher // *J. Agric. Food. Chem.* – 1997. Vol. 45. – P. 302-303.
59. Butz, P. Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment / P. Butz, R. Edenharder, A. Fernandez Garcia [et al.]; // *Food Research International* – 2002. Vol. 35. –P. 295-300.
60. Butz, P. Influence of high pressure treatment on sensorial and nutritional quality of fruit and vegetables. Trends in High Pressure Bioscience and Biotechnology / P. Butz, A. Fernandez, B. Tauscher // *Progress in Biotechnology* / Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. Amsterdam, Netherlands, 2000. - 652 p.
61. Butz, P. Emerging technologies: Chemical aspects / P. Butz, B. Tauscher // *Food Research International* – 2002. Vol. 35. – P. 279-284.

62. Hendrickx, M.E.G., Knorr, D. Ultra high pressure treatments of foods // Plenum Publishers, New York- USA – 2002 – 340 p. – SBN: 0-306-47278-3
63. Messens, W. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins / W. Messens, J.V. Camp, A. Huyghebaert // Trends in Food Science and Technology – 1997. Vol. 8. – P. 107-112.
64. Molina, E. Effects of combined high pressure and heat treatment on the textural properties of soya gels / E. Molina, D.A. Ledward // Food Chemistry – 2003. Vol. 80, – P. 367-370.
65. Solt, M., Autio, K. 1998. Advances in High Pressure Bioscience and Biotechnology // Microscopic and rheological characterization of high pressure treated starch dispersions / Edited by Horst Ludwig / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany - 1998. - P. 357-360 - ISBN: 978-3-642-60196-5
66. Hartmann, C. The influence of transport phenomena during high-pressure processing of packed food on the uniformity of enzyme inactivation / C. Hartmann, A. Delgado // Biotechnology and Bioengineering, - 2003. Vol. 82, No. 6, June 20. – P. 725-735.
67. Balasubramanian, S. Compression heating influence of pressure transmitting fluids on bacteria inactivation during high pressure processing / S. Balasubramanian, V.M. Balasubramaniam // Food Research International– 2003. Vol. 36. – P. 661-668.
68. Kingsley, D.H. Inactivation of Hepatitis A virus and a calivirus by high hydrostatic pressure / D.H. Kingsley, D.G. Hoover, E. Papafragkou, G Richards // Journal of Food Protection – 2002. Vol. 65(10). – P. 1605-1609.
69. Denys, S. Modeling heat transfer during high-pressure freezing and thawing / S. Denys, A.M. Van-Loey, M.E. Hendrickx, P. Tobback // Bitech. Prog. – 1997. Vol. 13 – P. 416-423.
70. Техническая термодинамика [Текст] : учебник / Мин-во образования и науки Донец Нар. Респ., Гос. орг. высш. проф. образования "Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила

Туган-Барановского", Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Донецкий национальный технический университет" ; коллектив авт.: Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Ржесик К.А., Лебедев А.Н. - Донецк : ДонНУЭТ, 2021. – 480 с.

71. Cheftel, J.C. Pressure-assisted freezing and thawing: Principles and Potential and Potential Applications / J.C. Cheftel, J. Levy, E. Dumay // *Food. Rev. Int.* – , 2000. Vol. 16(4) – P. 453- 483.
72. Le Bail, A. High pressure freezing and thawing of foods: A Review. / Le A. Bail, D. Chevalier, D.M. Mussa, ; M. Ghoul // *International Journal of Refrigeration* – 2002. Vol. 25. – P. 504-513.
73. Le Bail, A. High pressure thawing. application to selected sea-foods. Trends in High Pressure Bioscience and Biotechnology. / A. Le Bail, D. Mussa, J. Rouille, H.S. Ramaswamy [et al.] // *Progress in Biotechnology* / Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. – 2002. Amsterdam, Netherlands. - 668 p.
74. Ефремов Г.И. Макрокинетика процессов переноса, М., РХО МГТУ, 2001, – 289 с.
75. Chevalier, D. Pressure shift freezing of turbot (*Scophthalmus maximus*) and carp (*Cyprinus carpio*): effect on ice crystals and drip volumes. Trends in High Pressure Bioscience and Biotechnology / D. Chevalier, A. Le Bail, A. Sequeira-Munoz [et al.] // *Progress in Biotechnology*. Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. – 2002. Amsterdam, Netherlands.
76. Rastogi, N.K. Opportunities and challenges in high pressure processing of foods / N.K. Rastogi, K.S.M.S. Raghavarao, V.M. Balasubramaniam [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* – 2007. Vol. 47. – P. 69-112.
77. Chourot, J-M. Numerical modeling of high pressure thawing: Application to water thawing / J-M. Chourot, L Boillereaux, M. Havet [et al.] // *Journal of Food Engineering* – 1997. Vol. 34. – P. 63-75.
78. Trujillo, A.J. Application of high pressure treatment for cheese production. /

- A.J. Trujillo, M. Capellas, M. Buffa [et al.], // *Food Research International* – 2000. Vol. 33. – P. 311-316.
79. Ponce, E. Development of a cream caramel by high hydrostatic pressure at low temperature / E. Ponce, E. Beltran, E. Sendra [et al.] // *Advances in High Pressure Bioscience and Biotechnology* / Edited by Horst Ludwig / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany – 1998. – P. 341-344.
80. Sanchez-Moreno, C. Vitamin C, provitamin A, Carotenoids and other carotenoids in high-pressurized orange juice during refrigerated storage / C. Sanchez-Moreno, L. Plaza [et al.] // *J. Agric. FoodChem.* – 2003. Vol. 51. – P. 647-653.
81. Makita, T. Application of High pressure and thermo physical properties of water to biotechnology // *Fluid Phase Equilibria* – 1992. Vol. 76. – P. 87-95.
82. Venugopal, V. *Seafood processing: adding value through quick freezing, retortable packaging, and cook-chilling*, CRC press, Florida-USA, 2006. – 335 p.
83. Henry, C.J.K., Chapman, C. *Nutrition handbook of food processors*, Woodhead publishing, Cambridge-UK, 2002.– 435 p.
84. Fryer, D.M., Harvey, J.F. *High pressure vessels*, Springer, NY-USA, 1997. – 228 p. – ISBN: 9781461559894
85. Koizumi, M. and Nishihara, M. *Isostatic pressing: technology and applications*, Springer, New York-USA, 1991. – 406 p. – ISBN: 978-1851665969
86. Venugopal, V. *Seafood processing: adding value through quick freezing, retortable packaging, and cook-chilling*, CRC press, Florida-USA, 2006. – 335 p.
87. Rasanayagam, V. Compression heating of selected fatty food materials during high pressure processing / V. Rasanayagam, V.M. Balasubramaniam, E. Ting [et al.] // *Journal of Food Science* – 2003. Vol. 68, No.1. – P. 254- 259.
88. Barbosa-Canovas, G.V., & Rodriguez, J.J. Thermodynamic aspects of high

- hydrostatic pressure food processing, *Novel Food Processing Technologies*. CRC Press Florida, USA, 2005. – p. 183-205 – ISBN: 082475333X
89. Ting, E. Determining thermal effects in high pressure processing / E. Ting, V. M. Balasubramaniam, E. Raghubeer // *Food Technology* – 2002. Vol. 56(2). – P. 31-35.
90. Ghani, A.G.A. & Farid, M.M. Modeling of high pressure food processing using CFD, *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*, D.-W.Sun, ed., CRC Press, Florida-USA – 2007. – P. 537-553.
91. Большак Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. Л., "Машиностроение" (Ленингр. отд-ние), 1974, - 448 с.
93. Denys, S. Modeling conductive heat transfer and process uniformity during batch high pressure processing of foods / S. Denys, L.R. Ludikhuyze, A.M. Van Loey [et al.] // *Biotechnol. Prog.* –2000. Vol. 16. – P. 92-101.
94. Pehl, M. Experimental investigation on thermo fluid dynamical processes in pressurized substances. trends in high pressure bioscience and biotechnology / M. Pehl, F. Werner, A. // *Progress in Biotechnology* / Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. – 2002. Amsterdam, Netherlands. - 668 p.
95. Hartmann, C. Numerical Simulation of Thermodynamic and Fluid-dynamic processes during the high pressure treatment of fluid food systems // *Innovative Food Science and Emerging Technologies* – 2002. Vol. 3. – P. 11-18.
96. Pehl, M. First visualization of temperature fields in liquids at high pressure using thermochromic liquid crystals / M. Pehl,; F. Werner, A. Delgado // *Experiments in Fluids* – 2000. Vol. 29. – P. 302-304.
97. Otero, L. A model for real thermal control in high pressure treatment of foods / L. Otero, A.D. Molina-Garcia, A.M. Ramos [et al.] // *Biotechnol. Prog.* – 2002. Vol. 18. – P. 904-908.
98. Otero, L. Thermal control simulation in high pressure treatment of foods / L. Otero, A.D. Molina, P.D. Sanz // *High Pressure Research* – 2002. Vol. 22. –

P. 627-631.

99. Otero, L. Some interrelated thermo physical properties of liquid water and ice. I. A user-friendly modeling review for food high-pressure processing / L. Otero, A.D. Molina-Garcia, P.D. Sanz // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* – 2002. Vol. 42 (4). – P. 339-352.
100. Hartmann, C. Numerical simulation of thermo fluid dynamics and enzyme inactivation in a fluid food system under high hydrostatic pressure. *Trends in High Pressure Bioscience and Biotechnology* / C. Hartmann, A. Delgado // *Progress in Biotechnology* / Edited by Rikimaru Hayashi. Elsevier Science B.V. – 2002. Amsterdam, Netherlands. - 668 p.
101. Hartmann, C. Numerical simulation of convective and diffusive transport effects on a high pressure induced inactivation process / C. Hartmann, A. Delgado // *Biotechnology and Bioengineering* – 2002. Vol. 79, No. 1. – P. 94-104.
102. Hartmann, C. Convective and diffusive transport effects in a high pressure induced inactivation process of packed food / C. Hartmann, A. Delgado, J. Szczyk // *Journal of Food Engineering* – 2003. Vol. 59. – P. 33-44.
103. Hartmann, C. The influence of transport phenomena during high-pressure processing of packed food on the uniformity of enzyme inactivation / C. Hartmann, A. Delgado // *Biotechnology and Bioengineering* – 2003. Vol. 82, No. 6. – P. 725-735.
104. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М., "Энергия", 1970 г. - 424 с.
105. Hartmann C. Numerical simulation of the mechanics of a yeast cell under high hydrostatic pressure / C. Hartmann, A. Delgado // *Journal of Biomechanics* – 2004. Vol. 37. – P. 977-987.
106. Beckwith, T.G. Temperature measurements. *Mechanical Measurements* / T.G. Beckwith, R.D. Marangoni, H. John. Pearson Publishing, 2006 – 784 p. – ISBN: 9780201847659

107. Karwe, M. V., Khрана, M. Temperature non-uniformity in a high hydrostatic pressure food processing vessel // The Nineteenth International Symposium in Transport Phenomena (17-21 August, 2008, Reykjavik, Iceland).
URL: https://english.hi.is/faculty_of_industrial_engineering_mechanical_engineering_and_computer_science (дата обращения: 10.12.2015)
108. Karwe M.V., Khрана M.. Temperature non-uniformity during high hydrostatic pressure processing and its impact on food safety // HEAT AND MASS TRANSFER'2010, Proceedings of the 20th National and 9th International ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference. (Mumbai, India, January 4-6, 2010). – ISBN: 978-981-08-3813-3
URL: <http://rpsonline.com.sg/proceedings/9789810838133/index.html>
(дата обращения: 12.12 2015)
109. 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)
110. 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.
111. Исследование границ применимости некоторых расчетных формул сопротивления материалов / Ю. Н. Петрова, В. С. Вакулюк, **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.

112. 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.
113. 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.

114. Holman, J.P. Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company New York-USA, 1981. – 758 p.
115. Singh, R.P., Heldman, D.R. Introduction to food engineering. Academic Press, London-UK, 2003. – 864 p.
116. Brodkey, R.S.; Hershey, H.C. Transport Phenomena. A unified approach, Broadkey publishing, OH-USA, 2003.– 412 p.
117. Jaluria, Y., Torrance, K. Computational heat transfer. Hemisphere Publishing, Washington D.C.-USA, 1986. – 366 p,.
118. Gao, Z. CFD solution and experimental testing of buoyancy-driven convection caused by condensers immersed in a water tank of HPWH / Z. Gao, V.C. Mei, F.C. Chen // American Society of Mechanical Engineers – 2003.– P. 33-38.
119. Abbott, M.M., Van Ness, H.C. Theory and problems of thermodynamics. McGraw-Hill, NY-USA, 1972. - 346 p.
120. Hendrickx, M. E.G., Knorr, D., Ultra high pressure treatments of foods. Plenum Publishers, New York- USA, 2001. – 340 p.
121. Rasanayagam, V. Compression heating of selected fatty food materials during high pressure processing / V. Rasanayagam, V.M. Balasubramaniam, E. Ting [et al.] // Journal of Food Science – 2003. Vol. 68, No.1/ – P. 254- 259.
122. Barbosa-Canovas, G.V., & Rodriguez, J.J. Thermodynamic aspects of high hydrostatic pressure food processing, Novel Food Processing Technologies. CRCPressFlorida, USA, 2005. – 440 p,
123. Singh, R.P., Heldman, D.R. Introduction to food engineering. Academic Press, London-UK, 2003. – 864 p.
124. Gebhart, B. Buoyancy induced flows and transport / B. Gebhart, Y. Jaluria, R.L. Mahajan, B. Sammakia. Hemisphere Publishing Corporation, NY-USA, 1988. – 1001 p.
125. Современные процессы в пищевых производствах и инновационные

- технологии обеспечения качества пищевых продуктов [Коллективная монография] / Соколов С.А., Стеблянко В.Г., Севаторов Н.Н., Афенченко Д.С. [и др.]. / Харьков: Изд-во «НТМТ», 2016. - 625 с
126. 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.
127. 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».
128. Grewal B.S. Higher engineering mathematics. Khannapublishers,1996. – 400 p. – ISBN: 978-0750626279
129. ANSYS Fluent Tutorial Guide – Режим доступа: https://www.academia.edu/33546432/ANSYS_Fluent_Tutorial_Guide (дата обращения: 20.03.2020)
130. ANSYS Fluent UDF Manual – Режим доступа: https://www.academia.edu/31469967/ANSYS_Fluent_UDF_Manual (дата обращения: 20.03.2020)
131. Поршневу С.В. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием пакета MathCAD, Москва, Горячая линия - Телеком, 2002, 251 с.
132. 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.
133. Математическое моделирование процессов пищевых производств : Сб. задач : Учеб. пособие / Н.В. Остапчук, В.Д. Каминский, Г.Н. Станквич, В.П. Чучуй; Под ред. Н.В. Остапчука. – К.: Вища шк., 1992. – 175 с.
134. **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.
135. **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

електронний.

136. Поперчний А.М., Потапов В.О., Клірнійчук В.Г. Моделювання процесів та обладнання харчових виробництв. Підручник. - К.: Центр учбової літератури, 2012. - 312 с.
137. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока : монография / Ф.В. Недопекин, О.В. Казак, А.Н. Саенко – Рочтов-на-Дону : Издательство Южный федеральный университет, 2016. – 306 с.
138. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технических системах : Учебник. – Одесса: Друк, 2008. – 348 с.
139. 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 електронний.
140. Свешников А.А. Основы теории ошибок, Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1972, 122 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Листинг на языке С граничных условий подключаемых
к решателю ANSYS *Fluent*

```
/*изменение плотности воды*/
```

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_PROPERTY(cell_density, c, t)
```

```
{  
    real rho;  
    real time;  
    real temp = C_T(c, t);  
    time = RP_Get_Real("flow-time");  
    rho = 1155 -0.5 * temp + time;  
    return rho;  
}
```

```
/*определение теплопроводности*/
```

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_PROPERTY(cell_thermal_conductivity, c, t)
```

```
{  
    real tc;  
    real time;  
    real temp = C_T(c, t);  
    time = RP_Get_Real("flow-time");  
    tc = 0.18 + 0.0014 * temp + 0.0011 * time;  
}
```

```
        return tc;
    }

/*определение вязкости*/

#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, c, t)
{
    real visc;
    real time;
    real temp = C_T(c, t);
    time = RP_Get_Real("flow-time");
    visc = 3.7e-3 - 9.7e-6 * temp + 1.5e-6 * time;
    return visc;
}
```





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **83643** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
A22C 7/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: ц 2013 02473	(72) Винахідник(и): Сукманов Валерій Олександрович (UA), Соколов Сергій Анатолійович (UA), Севаторов Микола Миколайович (UA), Декань Олексій Олексійович (UA), Гура Олександр Васильович (UA), Афенченко Дмитро Сергійович (UA), Селезньова Юлія Анатоліївна (UA)
(22) Дата подання заявки: 28.02.2013	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.09.2013	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.09.2013, Бюл.№ 18	(73) Власник(и): ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН- БАРАНОВСЬКОГО, вул. Щорса, 31, м. Донецьк, 83050 (UA)

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕСТРУКТУРОВАНОЇ ШИНКИ "РАББІТНИЧА" З М'ЯСА КРОЛИКА

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення реструктурованої шинки з м'яса кролика включає подрібнення сировини, додавання прянощів, солі, пакування її в плівку, її обробку. Упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин.

UA 83643 U

UA 83643 U

UA 83643 U

Корисна модель належить до області виробництва м'ясних продуктів, зокрема до фізичного способу виготовлення реструктурованої шинки, і може бути використана на підприємствах м'ясопереробної промисловості для одержання високоякісного продукту.

Відомі способи обробки сировини для виготовлення шинки з м'яса кролика включають в себе подрібнення кролячого м'яса, додавання прянощів, солі, ферменту трансглютамінази, води чи льоду, масажування протягом 4-10 годин в залежності від характеристик сировини, дозрівання, формування в поліамідну плівку, осадку, термічну обробку в пароварочній камері та охолодження [1].

Загальними недоліками відомих способів виготовлення шинки з кролика є великі затрати матеріальних, енергетичних та часових ресурсів [2].

Найбільш близьким за технічною суттю і результатами, що досягаються, є спосіб виготовлення реструктурованого м'ясного продукту "Шинка Романовська", що включає в себе подрібнення кролячого м'яса, додавання прянощів, солі, ферменту трансглютамінази, води чи льоду, масажування протягом 4-10 годин в залежності від характеристик сировини або перемішування в мішалках, дозрівання, формування в поліамідну плівку, осадку, термічну обробку в пароварочній камері та охолодження [3].

Недоліками цього способу є те, що така обробка вимагає застосування обладнання з високими енергетичними витратами та надлишковими матеріальними вкладеннями за рахунок додавання ферменту трансглютамінази та льоду.

У патентній літературі відсутні джерела, які б описували можливість виготовлення шинки з виключенням додавання ферментів та льоду, наступної термічної обробки та охолодження.

В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб виготовлення реструктурованої шинки "РАББІТнича" з м'яса кролика з використанням високого тиску без термічної обробки та додавання ферментів та льоду, що дозволило б отримати шинку високої якості.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в способі виготовлення реструктурованої шинки "РАББІТнича" з м'яса кролика, який включає подрібнення сировини, додавання прянощів, солі, пакування в плівку, її обробку, згідно з корисною моделлю упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що передає тиск, вода заповнює робочу камеру установки високого тиску і шинку обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин.

Приклади конкретного виконання.

Приклад 1.

Для обробки було взято подрібнене кроляче м'ясо з додаванням спецій, солі, упаковане в стандартну плівку "Повіден". Температура сировини на час обробки становила 5 °С.

Спосіб реалізується таким чином: сировина, упакована в стандартну плівку "Повіден" масою 500 г встановлюється в робочій камері установки високого тиску. Як робоче середовище в камері високого тиску використовується дистильована вода.

Обробка відбувалась при заданих параметрах: тиск (МПа) - температура (°С) - час (хвил.) відповідно - 600-5-15.

Обробка сировини високим тиском дозволяє отримати шинку з нульовим значенням загального бактеріального обсіменіння. Так, згідно з вимогами ДСТУ 2661-94, кількість мезофільних аеробних та факультативних анаеробних мікроорганізмів КУО в 1 г. повинно бути не більше $1 \cdot 10^3$. Результати проведених досліджень наведені в табл. 1.

Таблиця 1,

Вплив високого тиску на мікробіологічні показники реструктурованої шинки

Зразок	Санітарно-бактеріологічні та хімічні показники		
	МАФАМ, не більше, КОЕ/г	БГКПв 0,1 г	Масова доля фенола, %
Нормативні вимоги	$1 \cdot 10^3$	не допускається	не більше 0,006
Сировина для виробництва шинки (сир)	690	-	0,128
Контроль (шинка, виготовлена за традиційною технологією)	160	не знайдено	0,005
Шинка, виготовлена за допомогою високого тиску (600 МПа)	0	не знайдено	0,005

UA 83643 U

Приклад 2. Спосіб реалізується так, як описано в прикладі 1, тільки обробку проводять під тиском 500 МПа, при температурі 10 °С протягом 20 хвилин.

5 Приклад 3. Спосіб реалізується аналогічно прикладу 1, тільки обробку проводять під тиском 400 МПа, при температурі 20 °С протягом 20 хвилин. При більш низьких температурі та тиску продукт не набуває потрібної якості, а створення більш високих, ніж пропоновані, температур та тиску економічно не вигідно.

Органолептичні характеристики шинки не зазнали змін та відповідають характеристикам шинки, виготовленої за традиційною технологією.

10 Переваги запропонованого способу виготовлення реструктурованої шинки, порівняно з відомими, полягають у наступному:

реалізація запропонованого способу виготовлення реструктурованої шинки забезпечує отримання готової реструктурованої шинки високої якості зі зменшеними матеріальними та енергозатратами.

15 Встановлено, що режим обробки реструктурованої шинки, який заявляється, вибраний із умов, які забезпечують повну стерилізацію і збереження первинних біологічних властивостей реструктурованої шинки.

Джерела інформації:

20 1. Технологія м'яса и м'ясних продуктів / Соколов А.А. [и др.]. - М.: Пищ. пром-сть, 1970.- 740 с.

2. Туменов, С.Н. Обработка мясных продуктов давлением / Туменов С.Н., Горбатов А.В., Косой В.Д. - М.: Агропромиздат, 1991.-207 с.

3. ТУ 10-18-11-007-90 (найближчий аналог).

25 **ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ**

Спосіб виготовлення реструктурованої шинки з м'яса кролика, який включає подрібнення сировини, додавання прянощів, солі, пакування її в плівку, її обробку, який **відрізняється** тим, що упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин.

30

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **83644** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
A22C 21/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **ц 2013 02474**
(22) Дата подання заявки: **27.02.2013**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.09.2013**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.09.2013, Бюл.№ 18**

(72) Винахідник(и):
**Сукманов Валерій Олександрович (UA),
Соколов Сергій Анатолійович (UA),
Севаторов Микола Миколайович (UA),
Декань Олексій Олексійович (UA),
Гура Олександр Васильович (UA),
Афенченко Дмитро Сергійович (UA),
Селезньова Юлія Анатоліївна (UA)**

(73) Власник(и):
**ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-
БАРАНОВСЬКОГО,
вул. Щорса, 31, м. Донецьк, 83050 (UA)**

(54) СПОСІБ ВИРОБНИЦТВА ШИНКИ КУРЯЧОЇ "ДУЕТ" З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОГО ТИСКУ

(57) Реферат:

Спосіб виробництва шинки курячої з використанням високого тиску включає пакування сировини в плівку, її обробку. Шинку занурюють в робочу рідину, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 300-500 МПа при температурі 3-40 °С протягом 10-40 хвилин.

UA 83644 U

UA 83644 U

UA 83644 U

- Корисна модель належить до харчової промисловості, а саме до розробки нового виду продукту з курячого м'яса, а саме шинки курячої зі шматочків м'яса курки, які залишилися після обвалки тушок і може бути використана на підприємствах м'ясопереробної промисловості для одержання високоякісної шинки тривалого зберігання без термічної обробки та додавання консервантів і барвників.
- Відомі способи теплової обробки шинки (варка з використанням гострої пари) знищують її мікрофлору і дозволяють подовжити терміни зберігання шинки до 7 днів [1].
- Загальними недоліками термічної обробки є негативний вплив на споживні властивості та харчову цінність шинки через значні зміни її хімічного складу [2].
- Найбільш близьким за технічною суттю і результатами, що досягаються, є спосіб обробки гострою парою, який передбачає нагрів продукту до температури, що забезпечує готовність шинки. При цьому способі обробки упаковану у плівку шинку нагрівають гострою парою до температури 72 °C всередині батона і потім охолоджують льодяною водою [3].
- Недоліками цього способу є те, що під час такої обробки в шинці спостерігаються значні зміни первинних властивостей, що погіршує її біологічні та органолептичні показники взагалі.
- У патентній літературі відсутні джерела, які б підтверджували можливість виготовлення шинки тривалого зберігання зі збереженою харчовою цінністю способом обробки її високим тиском без термічної обробки.
- В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб виробництва шинки високим тиском без термічної обробки, що дозволило б отримати шинку високої якості тривалого зберігання зі збереженням її первинних біологічних властивостей.
- Поставлена задача вирішується за рахунок того, що спосіб виготовлення шинки з використанням високого тиску, який включає пакування сировини в плівку, її обробку, згідно з корисною моделлю, що шинку занурюють в робочу рідину, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 300-500 МПа при температурі 3-40 °C протягом 10-40 хвилин.
- Дані параметри були отримані в результаті проведеного експерименту з урахуванням ступеня впливу високого тиску на мікробіологічні, фізико-хімічні, структурно-механічні та органолептичні показники отриманого продукту. Так, тиск 300-800 МПа має пригноблюючу дію на патогенну мікрофлору та на показник загальної кількості мікроорганізмів. За рахунок використання високого тиску досягається кулінарна готовність шинки без втрати її харчової цінності.
- Температура 3-20 °C є такою, при якій не піддаються змінам поживні властивості шинки, що дозволяє максимально зберегти первинну біологічну цінність продукту.
- Тривалість обробки 10-40 хвилин підвищує ефект дії високого тиску на патогенну мікрофлору шинки та інактивацію кислотої фосфатази.
- Приклади конкретного виконання.
- Приклад 1.
- Для обробки було взято сировину, що складається зі шматочків м'яса курки, які залишилися після обвалки тушок, солі та прянощів, упаковану в стандартну плівку "Повіден". Температура сировини на час обробки становила 3 °C.
- Спосіб реалізується таким чином: сировина, упакована в стандартну плівку "Повіден" масою 500 г встановлюється в робочій камері установки високого тиску. Як робоче середовище в камері високого тиску використовується дистильована вода.
- Обробка відбувалась при заданих параметрах: тиск (МПа) - температура (°C) - час (хвиль) відповідно - 500-3-20.
- Обробка сировини високим тиском дозволила отримати шинку за показником загального бактеріального обсіменіння 160 КУО в 1 г, у той час як при термічній обробці цей показник складав 550 КУО в 1 г. Згідно з вимогами ДСТУ 2661-94, кількість мезофільних аеробних та факультативних анаеробних мікроорганізмів КУО в 1 г. повинно бути не більше $1 \cdot 10^3$.
- Приклад 2. Спосіб реалізується так, як описано в прикладі 1, тільки обробку проводять під тиском 300 МПа, температурі 15 °C протягом 10 хвилин.
- Приклад 3. Спосіб реалізується аналогічно прикладу 1, тільки обробку проводять під тиском 300 МПа, температурі 40 °C протягом 20 хвилин.
- Дослідження показали, що тривалість збереження виготовленої за допомогою високого тиску шинки збільшується до 20 днів, при температурі збереження 0-6 °C.
- Органолептичні та структурно-механічні характеристики шинки значно кращі, ніж у шинки, виготовленої класичним способом. При більш низьких температурі та тиску продукт не набуває потрібної якості, а створення температури й тиску вищих, ніж пропонувані, економічно не вигідно.

UA 83644 U

Переваги запропонованого способу виготовлення шинки, порівняно з відомими, полягають у наступному:

5 реалізація запропонованого способу виготовлення шинки забезпечує отримання готової шинки тривалого зберігання високої якості із максимальним збереженням її первинних властивостей.

Встановлено, що режим обробки шинки, який заявляється, вибраний із умов, які забезпечують максимальне зниження показника загального мікробного обсіменіння та наявності патогенної мікрофлори і збереження первинних біологічних властивостей шинки, що значно підвищує її харчову цінність у порівнянні з шинкою, яка була виготовлена традиційним способом (варка гострою парою), та збільшує терміни збереження до 20 діб.

10 Запропонований спосіб дозволяє отримувати шинку високої біологічної цінності тривалого зберігання в промислових умовах.

Джерела інформації:

15 1. Рогов И.А., Забашта А.Г., Козюлин Г.П. Общая технология мяса и мясопродуктов, М. Колос, 2000.-367 с.

2. Косой, В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас / Косой В.Д. - М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1983.-272 с.

20 3. Забашта А.Г. Технология реструктурированных формованных мясопродуктов./ Забашта А.Г., Письменская В.Н., Басов В.О., Козюлин Р.Г // М.: МГУПБ, 2004, /найближчий аналог/.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб виробництва шинки курячої з використанням високого тиску, що включає пакування сировини в плівку, її обробку, який **відрізняється** тим, що шинку занурюють в робочу рідину, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 300-500 МПа при температурі 3-40 °С протягом 10-40 хвилин.

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **136071** (13) **U**
(51) МПК (2019.01)
A23L 17/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 00177**
(22) Дата подання заявки: **04.01.2018**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.08.2019**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.08.2019, Бюл.№ 15**

(72) Винахідник(и):
**Гура Олександр Васильович (UA),
Соколов Сергій Анатолійович (UA),
Севаторов Микола Миколайович (UA),
Декань Олексій Олексійович (UA),
Афенченко Дмитро Сергійович (UA),
Маліч Олександр Анатолійович (UA)**

(73) Власник(и):
**Гура Олександр Васильович,
вул. Маршала Тимошенка, 13, кв. 107, м.
Київ, 04212 (UA),
Соколов Сергій Анатолійович,
мкр. Лазурний, 28, кв. 26, м. Покровськ,
85000 (UA),
Севаторов Микола Миколайович,
вул. Пушкіна, 26, кв. 11, м. Київ, 83014 (UA),
Декань Олексій Олексійович,
вул. Леніна, 42, кв. 30, м. Селідово, 85400
(UA),
Афенченко Дмитро Сергійович,
вул. Молодіжна, 89, с. Улакли,
Великоновосілівський р-н, 85543 (UA),
Маліч Олександр Анатолійович,
вул. Чернишевського, 85, кв. 169, м. Харків,
61002 (UA)**

UA 136071 U

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕСТРУКТУРОВАНОЇ РИБНОЇ КОВБАСИ

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення реструктурованої рибної ковбаси з використанням високого тиску включає пакування сировини в плівку, її обробку. Упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що виконує функцію середовища, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин без додавання структуроутворюючих речовин, та виключає стадію теплової обробки.

UA 136071 U

Корисна модель належить до продуктів переробки риби, а саме до фізичного способу виготовлення реструктурованих рибних ковбас, і може бути використана в рибопереробній промисловості для одержання високоякісного продукту.

5 В останні роки велике розповсюдження отримали формовані рибні вироби, в тому числі, рибні ковбаси (SU 384510, SU 1178395, SU2003/0198732, DE 10111941).

Так, відомий формований виріб, отриманий з рибного фаршу, в тому числі, ферментованого препаратом з нутроців краба і молочнокислих бактерій (Патент України № 2212175).

10 Формовані вироби, у тому числі, ковбаси, отримані з додаванням в фаршеву суміш структуроутворюючого агенту, наприклад, препарату трансглютамінази "Активна ЕВ", зберігають монолітну структуру.

Однак формованими виробами більш високої якості, які зберігають більшу кількість поживних речовин та мають більш натуральні органолептичні показники, є рибні ковбаси, отримані без додавання структуроутворюючих речовин.

15 Найбільш близьким аналогом є відома ковбаса рибна копчена, виконана у вигляді оболонки, наповненої начинкою, отриманої з композиції, що складається з скибочок солонної риби розміром від 20 до 100 мм і допоміжних речовин, що включають структуроутворюючий агент (Патент RU 2311832). Як структуроутворюючий агент начинка містить м'ясо головоногих водних тварин в кількості від 8 мас. %, а також додатково карагенан, соєвий білок або крохмаль та загусник, загальна кількість яких (не рахуючи м'яса головоногих водних тварин) може досягати

20 18 мас. %.

Така кількість структуроутворюючих агентів забезпечує можливість отримання виробу з пружною консистенцією, тобто стійкою формою, але з очевидністю позбавляє ковбасу смаку і поживної цінності натуральної риби з-за присутності великої кількості "нерибних" компонентів.

25 В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб виготовлення реструктурованої рибної ковбаси з використанням високого тиску без термічної обробки та додавання структуроутворюючих речовин, що дозволило б отримати ковбасу високої якості при тисках у діапазоні від 400 до 600 МПа.

30 Поставлена задача вирішується за рахунок того, що спосіб виготовлення реструктурованої рибної ковбаси з використанням високого тиску, який включає пакування сировини в плівку, її обробку, згідно з корисною моделлю, упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що виконує функцію середовища, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °C протягом 10-20 хвилин.

Приклади конкретного виконання.

35 **Приклад 1.**

Для обробки було взято подрібнений рибний фарш (розміри шматочків 3-8 мм) з додаванням спецій, упакований в стандартну плівку "Повіден". Температура сировини на час обробки становила 5 °C.

40 Спосіб здійснюють таким чином: сировину, упакована в стандартну плівку "Повіден" масою 200 г встановлюють в робочій камері установки високого тиску. Як робоче середовище в камері високого тиску використовується дистильована вода.

Обробка відбувалась при заданих параметрах: тиск (МПа) температура (°C) - час (хвил) відповідно - 600-5 - 15.

45 Обробка сировини високим тиском дозволяє отримати рибну ковбасу однорідної пружної консистенції, повністю готову для споживання.

Приклад 2.

Спосіб реалізується так, як описано в прикладі 1, тільки обробку проводять під тиском 500 МПа, при температурі 10 °C протягом 20 хвилин.

Приклад 3.

50 Спосіб реалізується аналогічно прикладу 1, тільки обробку проводять під тиском 400 МПа, при температурі 20 °C протягом 20 хвилин.

Органолептичні характеристики рибної ковбаси не зазнали змін та відповідають характеристикам рибної ковбаси, виготовленої за традиційною технологією.

55 Переваги запропонованого способу виготовлення реструктурованої рибної ковбаси, порівняно з відомими, полягають у наступному:

реалізація запропонованого способу виготовлення реструктурованої рибної ковбаси забезпечує отримання готового продукту високої якості з більш натуральними органолептичними показниками та зі зменшеними матеріальними та енергозатратами.

UA 136071 U

Встановлено, що режим обробки реструктурованої рибної ковбаси, який заявляється, обраний із умов, які забезпечують повну стерилізацію і збереження первинних біологічних властивостей продукту.

5 ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- Спосіб виготовлення реструктурованої рибної ковбаси з використанням високого тиску, який включає пакування сировини в плівку, її обробку, який **відрізняється** тим, що упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що виконує функцію середовища, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин.

Комп'ютерна верстка Л. Литвиненко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

(11) **136071**(19) **UA**(51) МПК (2019.01)
A23L 17/00(21) Номер заявки: **u 2018 00177**(22) Дата подання заявки: **04.01.2018**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.08.2019**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **12.08.2019, Бюл. № 15**

(72) Винахідники:

Гура Олександр Васильович, UA, Соколов Сергій Анатолійович, UA, Севаторов Микола Миколайович, UA, Декань Олексій Олексійович, UA, Афенченко Дмитро Сергійович, UA, Маліч Олександр Анатолійович, UA

(73) Власники:

Гура Олександр Васильович, вул. Маршала Тимошенка, 13, кв. 107, м. Київ, 04212, UA, Соколов Сергій Анатолійович, мкр. Лазурний, 28, кв. 26, м. Покровськ, 85000, UA, Севаторов Микола Миколайович, вул. Пушкіна, 26, кв. 11, м. Київ, 83014, UA, Декань Олексій Олексійович, вул. Леніна, 42, кв. 30, м. Селідово, 85400, UA, Афенченко Дмитро Сергійович, вул. Молодіжна, 89, с. Улакли, Великоновосілківський р-н, 85543, UA, Маліч Олександр Анатолійович, вул. Чернишевського, 85, кв. 169, м. Харків, 61002, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕСТРУКТУРОВАНОЇ РИБНОЇ КОВБАСИ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб виготовлення реструктурованої рибної ковбаси з використанням високого тиску, який включає пакування сировини в плівку, її обробку, який відрізняється тим, що упаковану сировину занурюють в дистильовану воду, що виконує функцію середовища, що передає тиск, яка заповнює робочу камеру установки високого тиску і обробляють під тиском 400-600 МПа при температурі 3-20 °С протягом 10-20 хвилин.

(11) 136071

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 1871070819.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.

2. Виконати пошук за номером заявки.

3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

12.08.2019





Министерство образования и науки
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

ул. Щорса 31, г. Донецк, 283050 Тел.: 342-90-40 Факс: (062)304-83-16 Эл. почта: info@donnuet.education

03.11.2021 № 13/1999
на № _____ от _____
г _____

В диссертационный совет Д 01.025.02 на
базе ГО ВПО «Донецкий национальный
университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Афенченко Д.С. на тему «Исследование тепло-гидродинамических процессов при
обработке пищевых продуктов высоким давлением», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Результаты исследований, которые представлены в диссертационной
работе Афенченко Д.С. «Исследование тепло-гидродинамических процессов при
обработке пищевых продуктов высоким давлением», используются в учебном
процессе при изложении дисциплин «Процессы и аппараты пищевых
производств», «Технологическое оборудование пищевых производств в отрасли»,
«Проектирование деталей машин методами компьютерного моделирования» для
студентов направлений подготовки 15.03.02 «Технологические машины и
оборудование», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» профилей
подготовки «Оборудование перерабатывающих и пищевых производств» и
«Холодильные машины и установки».

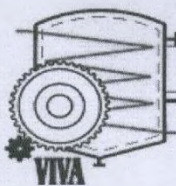
Использование в учебном процессе результатов диссертационной работы
Афенченко Д.С. является целесообразным для повышения уровня подготовки
студентов в направлении более углубленного овладения материалом по
моделированию технологических процессов и предварительной проработке
конструктивных особенностей оборудования.

Проректор
д.э.н., профессор



В. Зарелу

Е.М. Азарян



ООО «Фирма «ВИ-ВА»

Тел./факс (062) 340-56-28, (062) 340-56-20
 e-mail: vivaltd@yandex.ua, vivaltd@skif.net www.vivaltd.ua
 ДНР, 83001 г. Донецк, ул. Горького, 146 ИКЮЛ : 50003878
 р/с 40702810920450000146 ИНН 51000050 БИК 310101001

73/01 от 29.10.21г.

В диссертационный совет Д 01.025.02 на базе ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
 Аfenченко Дмитрия Сергеевича
 на тему «Исследование тепло-гидродинамических процессов при обработке
 пищевых продуктов высоким давлением»,
 представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
 по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Выдана Аfenченко Дмитрию Сергеевичу в том, что ООО "Фирма ВИ-ВА" в своей деятельности готова использовать технические разработки принадлежащие автору диссертационной работы «Исследование тепло-гидродинамических процессов при обработке пищевых продуктов высоким давлением». Полученная автором математическая модель температурной гетерогенности в камере высокого давления может быть применена при предварительной проработке конструктивных особенностей проектируемого оборудования высокого давления для пищевой и перерабатывающей промышленности.

Директор
 ООО "Фирма ВИ-ВА"



В.И. Литвин