

На правах рукописи



Зиборов Дмитрий Михайлович

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ
В КАЧЕСТВЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕПЛОМ
ОБОРУДОВАНИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИТАНИЯ**

Специальность: 05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре ресторанного бизнеса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова».

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Ботов Михаил Иванович

Официальные оппоненты:
Воскобойников Владимир Александрович
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет - МСХА имени К.А. Тимирязева», профессор
кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих
производств»

Шихалев Сергей Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический
университет», доцент кафедры пищевой инженерии

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет инженерных технологий" (ФГБОУ ВО "ВГУИТ")

Защита состоится «12» октября 2017 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.196.07 на базе ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, корп. 3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации: <http://ords.rea.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.196.07

доктор химических наук, профессор



Татьяна Ивановна Чалых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие сети общественного питания является важным условием развития любого современного государства.

Научно-технический прогресс, быстрое внедрение результатов научных исследований, являются основой повышения эффективности промышленного производства.

Отрасль пищевого машиностроения должна выпускать современное технологическое оборудование для предприятий общественного питания, использующее инновационные технологические процессы, позволяющие достигать максимальной экономической эффективности.

В данной работе исследуется тепловое оборудование, в котором осуществляются кулинарные тепловые процессы (варки, жарки и выпечки) при помощи наиболее эффективного с точки зрения технологии приготовления пищи косвенного обогрева стенки рабочей камеры, и решаются проблемы коренного улучшения тепловых аппаратов.

Косвенный обогрев стенок рабочих камер пищевого оборудования традиционно осуществляет при помощи включения в конструкцию аппаратов так называемых греющих рубашек, внутри которых находится промежуточный теплоноситель. Такие рубашки применяются как в варочном, так и в жарочном оборудовании.

Выпускаемые серийно отечественные и зарубежные пищеварочные котлы, и автоклавы имеют косвенный обогрев рабочих емкостей, осуществляемый промежуточных теплоносителем - водяным паром. Использование такого пара в качестве промежуточной греющей среды при избыточном давлении в рубашках 50 кПа (0,5 бар) в котлах и 250 кПа (2,5 бар) в автоклавах приводит к перерасходу металла на утолщение стенок аппаратов и к необходимости устанавливать запорную и предохранительную арматуру, а также резко сокращает долговечность греющих рубашек и парогенераторов вследствие интенсивно протекающих процессов коррозии. Вследствие использования избыточного давления в греющих рубашках, под угрозой находится безопасность персонала, обслуживающего тепловые аппараты. Возможны ожоги горячим паром и, при поломке предохранительного клапана, взрывная разгерметизация греющей рубашки.

Процессы жарки основным способом (в тонком слое масла) и во фритюре, а также процессы выпечки, требуют равномерного температурного поля на рабочих поверхностях

и объемах сковород, фритюрниц, пекарных шкафов, которое обеспечивало бы равномерный нагрев всей площади приготавливаемого продукта.

Выпускаемые серийно жарочные аппараты с непосредственным обогревом, работающие на твердом и жидком топливе, газе и даже на электроэнергии не обеспечивают необходимой равномерности обогрева.

Использование водяного пара в качестве промежуточного теплоносителя в сравнительно небольших тепловых аппаратах, предназначенных для предприятий общественного питания, приводит к значительному увеличению их металлоемкости из-за утолщения стенок греющих рубашек, а также из-за установки запорной арматуры и приборов контроля давления.

Отсюда вытекает необходимость применения теплоносителей, обладающих температурой кипения при атмосферном давлении, которая на 5-10°C превышает температуру технологических процессов.

Для решения этой важной проблемы необходимо предложить новый теплоноситель, который обеспечивая технологический процесс необходимым температурным уровнем, не требовал бы избыточного давления (либо требовал бы минимальных избыточных давлений) в греющих рубашках и не оказывал бы серьезного коррозионного воздействия на внутренние стенки греющих рубашек тепловых аппаратов при небольших перепадах температур между греющей и нагреваемой средами, т. е. обеспечил бы реализацию равномерного температурного поля на всей стенке рабочей камеры.

Перспективны в этом плане водные растворы этиленгликоля ($C_2H_4(OH)_2$) и пропиленгликоля ($C_3H_6(OH)_2$), устойчиво работающие как в однофазном, так и в двухфазном состоянии и имеющие температуру кипения чистого компонента 197°C и 188°C соответственно, близкую к верхнему уровню режимных значений жарочных технологических аппаратов. Изменение концентраций водных растворов этих веществ позволяет получить температуру кипения теплоносителя, в точности соответствующую требуемому уровню нагрева стенки рабочей камеры в зависимости от вида температурной обработки и осуществлять нагрев без повышения давления в теплообменнике.

Используя данные теплоносители и их растворы можно полностью избежать необходимости герметизации и вакууммирования теплообменников, упростить их конструкцию и значительно снизить материалоемкость.

Степень разработанности темы Исследования по изучаемой тематике представлены значительным набором литературных источников, которые в основном посвящены изучению теплообмена в рубашечном пространстве тепловых технологических аппаратов при использовании в качестве промежуточного теплоносителя водяного пара. В исследованиях, приведенных в первой главе диссертационной работы, проводится анализ и расчет оптимальной формы варочного сосуда и рубашечного пространства пищеварочных котлов с целью снизить материалоемкость. Исследовался процесс конденсации пара в пространстве рубашки тепловых аппаратов общественного питания, однако во всех исследованиях в качестве промежуточного теплоносителя использовался водяной пар.

Целью исследования является совершенствование теплового технологического оборудования предприятий общественного питания, повышение качества выпускаемой кулинарной продукции, на основе использования двухфазных промежуточных теплоносителей – водных растворов пропиленгликоля, обеспечивающих устойчивую и эффективную работу при давлениях, близких к атмосферному, создающих двузонный (изотермический в каждой зоне) обогрев стенок рабочих камер, исключаящих их перегрев в холостых зонах.

Для выбора нового промежуточного теплоносителя, необходимо решить следующие **задачи**:

1. На основании технологических предпосылок определить основные требования, предъявляемые к пищевым продуктам, а также к системе для их нагревания.
2. Аналитически определить теплофизические параметры водных растворов веществ, подходящих по своим характеристикам на роль промежуточных теплоносителей.
3. Разработать методику и создать стенд для испытаний водных растворов пропиленгликоля в качестве промежуточного теплоносителя и произвести технологические испытания аппарата.
4. Сопоставить свойства различных теплоносителей и предложить выбор оптимального варианта теплоносителя для разных групп технологических аппаратов.
5. Рассмотреть специфические случаи теплообмена, которые свойственны греющим рубашкам тепловых аппаратов предприятий общественного питания.

6. Рекомендовать водные растворы выбранного вещества для основных групп теплового оборудования, используемого на предприятиях общественного питания и энергосистемы мобильных предприятий питания.

Научная новизна. Впервые испытан теплоноситель на основе водного раствора пропиленгликоля, способный работать как в рубашках тепловых пищеварочных аппаратов с косвенным обогревом, так и в системах жидкостного отопления мобильных или временных предприятий общественного питания. Исследован теплообмен в рубашечном пространстве и варочной камере, проведено сравнение с теплообменом при применении стандартного теплоносителя, применяемого в рубашечных пищеварочных аппаратах – водяного пара. Проведены испытания разработанного теплоносителя на экспериментальной установке, на основе настольного рубашечного пищеварочного котла фирмы Groep, проведено сравнение характера теплообмена при испытании экспериментальной установки на воде и на разработанном теплоносителе.

Теоритическая и практическая значимость. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность использования водных растворов пропиленгликоля в качестве двухфазных промежуточных теплоносителей. Водные растворы пропиленгликоля при рекомендуемых концентрациях обеспечивают «мягкий» косвенный двухфазный обогрев стенки рабочей камеры варочных и жарочных аппаратов предприятий общественного питания работая при атмосферном давлении, что значительно упрощает конструкцию, устраняет необходимость использования контрольной и предохранительной арматуры, снижает металлоемкость, и, как следствие, увеличивает надежность и долговечность оборудования при значительном снижении себестоимости.

Материалы диссертации использовались в НИР «Совершенствование теплового технологического оборудования предприятий общественного питания на основе использования перспективных теплоносителей» (Договор № 103-НИР от 01.08.2016).

Положения, выносимые на защиту:

1. На современных предприятиях общественного питания необходим новый двухфазный промежуточный теплоноситель, обеспечивающий мягкий косвенный обогрев стенок рабочих камер, работающий при малом избыточном или атмосферном давлении и создающих двузонный обогрев стенок рабочих камер, исключаяющих их перегрев в холостых зонах.

2. Водные растворы пропиленгликоля – подходящий по всем параметрам промежуточный теплоноситель, теплофизические параметры которого можно менять в зависимости от концентрации и безопасный при этом для человека.
3. Современные серийные рубашечные тепловые аппараты предприятий питания могут работать с перспективными теплоносителями на основе пропиленгликоля без значимого изменения их конструкции.
4. Существующая методика расчета водяных паровых теплообменников подходит и для расчета поверхности нагрева теплообменников, использующих в качестве промежуточного теплоносителя водные растворы пропиленгликоля.

Апробация работы. Материалы диссертации представлены на следующих научно-практических конференциях: «Двадцать пятые Международные Плехановские чтения», 10-16 февраля 2012 года; Всероссийская научно-практическая конференция «Липатовские чтения», 27 февраля 2014 года; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экономические проблемы внедрения и использования нанопроductов и нано-технологий», 30 ноября 2011 года; Всеукраинская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы развития пищевых производств, ресторанного и гостиничного хозяйства и торговли», 25 апреля 2014 года.

Личный вклад соискателя в проведенное исследование. Автор самостоятельно провел анализ отечественной и зарубежной литературы, относящейся к теме исследования, составил организационный план исследования, схему экспериментального стенда. Автор лично разработал и собрал экспериментальный стенд, провел серию экспериментов с различными теплоносителями, которые приготовил лично из закупленных химикатов. Лично автором проведен сбор, обработка и анализ экспериментальных данных, сформулированы выводы и подготовлены рекомендации по практическому применению результатов исследования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Положения диссертации соответствуют паспорту научной специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств. Результаты проведенного исследования соответствуют области исследования специальности, конкретно пунктам 3 и 6.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации» и 1 монография.

Объем и структура диссертации. Основное содержание диссертации изложено на 123 страницах машинописного текста. Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы, приложений. Список литературы включает 157 источников, из них 17 зарубежных. Текст иллюстрирован 25 таблицами и 32 рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и новизна работы, определяются цель и задачи исследования и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор информации по научной проблеме, связанной с темой диссертационного исследования, поставлены задачи исследования по определению теплофизических характеристик промежуточных теплоносителей – водных растворов, необходимых для расчета поверхностей нагрева теплообменников при их использовании, рассмотрены основные теплоносители, используемые в тепловых рубашечных варочных и жарочных аппаратах предприятий общественного питания и в системах жидкостного отопления мобильных предприятий общественного питания. Выполнен обзор аналитических методов расчёта теплофизических характеристик водных растворов, необходимых для конструктивного расчета теплообменников.

Во второй главе приведен сравнительный анализ теплоносителей, используемых в системах теплоснабжения предприятий общественного питания, в технологических тепловых кулинарных аппаратах и предложены для использования в качестве двухфазных теплоносителей водные растворы, изменяющие точку кипения при изменении их концентрации, с учетом изменения температуры пара базового компонента. Рассмотрена возможность использования водных растворов солей и щелочей, повышающих точку кипения в результате температурной депрессии. Рассмотрены водные растворы этиленгликоля и пропиленгликоля, в которых понижается температура кипения при уменьшении их концентрации. Приведены концентрации вышеуказанных растворов, обеспечивающие температурные уровни, необходимые для эффективной работы низкотемпературного (варочного) и высокотемпературного (жарочного) теплового кулинарного оборудования.

Для описания теплообмена при конденсации, как и для всех других процессов теплоотдачи, применены общепринятые уравнения теплоотдачи. При расчете теплопередающих поверхностей технологических аппаратов используются уравнения теплопередачи, в которых определяющее значение для коэффициента теплопередачи имеют коэффициенты теплоотдачи со стороны греющего пара к стенке варочного сосуда и от стенки варочного сосуда к нагреваемой жидкости.

Для аналитического расчета определяемых теплофизических характеристик водных растворов, предлагаемых в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей, применялись методы, предложенные Е. М. Шадринной и Г.В. Волковой.

Приведены результаты расчетов теплофизических характеристик водных растворов солей и щелочей, рассматриваемых в качестве перспективного универсального двухфазного промежуточного теплоносителя.

Проведена оценка технической и тепловой целесообразности использования водных растворов солей и щелочей, а также этиленгликоля ($C_2H_4(OH)_2$), пропиленгликоля ($C_3H_6(OH)_2$), с целью их использования в пищеварочных котлах в двухфазном состоянии при температуре 105...110 °С при нормальном атмосферном давлении.

Были рассчитаны теплофизические характеристики этих растворов при концентрациях, обеспечивающих температуру кипения 110 °С. С применением полученных характеристик была рассчитана и спроектирована прозрачная модель теплообменника тупикового типа, имитирующая работу паровой рубашки пищеварочных котлов. Эксперимент подтвердил работоспособность водных растворов NaCl, KOH, NaOH, $CaCl_2$, $MgCl_2$, работающих при концентрациях 20..30%, исходя из условий температурной депрессии. Однако экспериментальными исследованиями выявлена недопустимо высокая скорость выпадения кристаллов из исследуемых растворов в процессе кипения.

В качестве альтернативных теплоносителей также рассмотрены водные растворы этиленгликоля ($C_2H_4(OH)_2$), и пропиленгликоля ($C_3H_6(OH)_2$). Этиленгликоль давно и хорошо зарекомендовал себя в качестве теплоносителя, он используется в системах отопления зданий и сооружений, в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Однако он токсичен и не может быть применен в оборудовании для приготовления кулинарной продукции. Близким к нему по химической структуре и теплотехническим свойствам теплоносителем, работающем в двухфазном состоянии,

является пропиленгликоль. Этот теплоноситель абсолютно безопасен и сертифицирован в качестве пищевой добавки Е-1520 (СанПиН 2.3.2.560-96 "Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов").

Водный раствор пропиленгликоля также примечателен тем, что на сегодняшний день он используется в качестве основы для теплоносителей жидкостных систем отопления.

Промышленность выпускает широкий спектр теплоносителей, представляющих собой водные растворы пропиленгликоля с некоторыми добавками. Эти теплоносители используются как в быту, так и на предприятиях в отопительных системах, в качестве автомобильных охлаждающих жидкостей (антифризов), антиобледенителей. Помимо пропиленгликоля и воды, в их состав входят антикоррозионные, антипенные, стабилизирующие и другие функциональные добавки.

На рисунке 1 представлена полученная зависимость температуры кипения водного раствора пропиленгликоля в зависимости от концентрации раствора. Выделена зона (102..110°C), показывающая возможность использования водных растворов пропиленгликоля в качестве двухфазных промежуточных теплоносителей, применяемых для косвенного обогрева стенок рабочих камер в варочных аппаратах предприятий общественного питания. Температура кипения при нормальном атмосферном давлении чистого (концентрация 100%) пропиленгликоля составляет 189 °C, что позволяет использовать его в высокотемпературном жарочном оборудовании предприятий общественного питания. Уменьшение концентрации водного раствора пропиленгликоля приводит к снижению температуры кипения до температуры порядка 110°C, необходимой для работы в варочном оборудовании предприятий общественного питания.

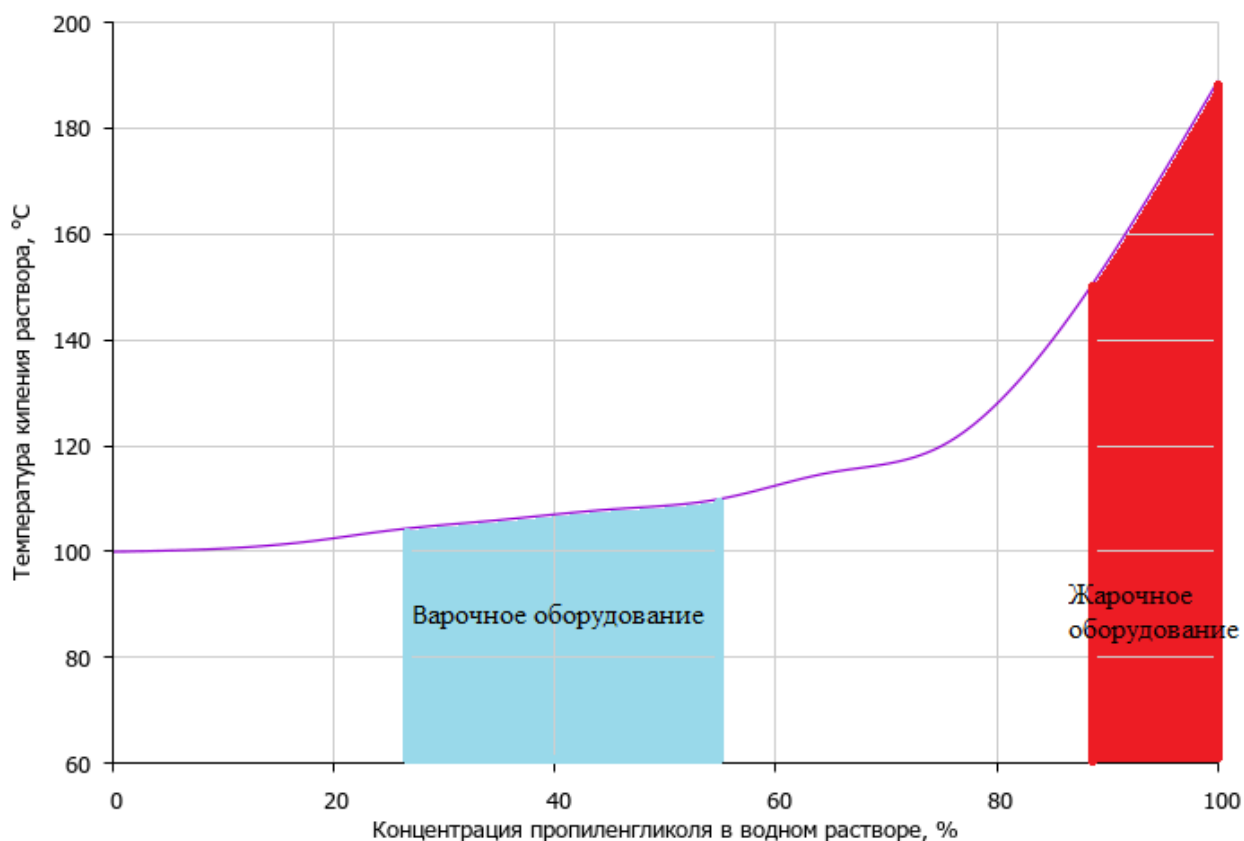


Рисунок 1 - Зависимость температуры кипения водного раствора пропиленгликоля от его концентрации

Исходя из вышеизложенного, для применения в варочном оборудовании предприятий питания рекомендованы концентрации водного раствора пропиленгликоля на уровне 48-55%, а для применения в жарочном оборудовании концентрации на уровне 80-100%.

В третьей главе приведена методика эксперимента и описан экспериментальный стенд.

Экспериментальный стенд.

Оценки возможности использования предложенных перспективных теплоносителей, а так же для сбора данных о ходе теплообменных процессов в рубашке котла и пищеварочном сосуда, на основе которых можно рассчитать коэффициенты теплопередачи, был создан экспериментальный стенд на базе настольного

малогабаритного электрического пищеварочного котла фирмы Groep (США), модели TDB/6-10, рубашечного типа, вместимостью варочного сосуда $0,01 \text{ м}^3$, рубашки - $0,0035 \text{ м}^3$, площадью рубашки $0,55 \text{ м}^2$. Мощность нагревательного элемента (ТЭНа) (13) котла составляет 4 кВт. Указанный котел был переоборудован: снабжен тепловой изоляцией и дополнительными элементами, позволяющими производить термометрические и калориметрические измерения. На созданной установке проводились исследования, как стандартного теплоносителя – воды, так и перспективных – чистого пропиленгликоля (концентрация 100%) и его водных растворов.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.

Исследуемый пищеварочный котел оснащен предохранительным клапаном (7), воронкой (6), через которую осуществляется заливка теплоносителя в рубашку (3), и манометром (5), измеряющим давление в пароводяной рубашке со шкалой измерения от - 0,5 до 5 бар и ценой деления 0,1 бар. Варочный сосуд (1) и стенка рубашки (2) из нержавеющей стали AISI 321 (08X18H10T). Перед началом эксперимента котел без промежуточного теплоносителя и жидкости в варочном сосуде взвешивался на весах, общая масса котла (варочной емкости, основания и блока управления) составила 22,6 кг.

Котел подключался к сети переменного тока напряжением 220В через комплект измерительных приборов К505 (16), измеряющий силу тока, напряжение и мощность, а также автоматический регулируемый лабораторный трансформатор TDGC2-5k (19). На внутренней поверхности варочного сосуда, а также на внешней стенке котла размещались хромель-копелевые термопары T1, T2...T10 с диаметром термоэлектрода 0,5 мм (9), термопары на внешней стенке рубашки теплоизолированы. Кроме того, одна термопара была закреплена на кронштейне в центре варочного сосуда. Все термопары подключались к самопишущему потенциометру КСП-4 (15) со шкалой измерения $0..150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и ценой деления $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для определения начальных условий эксперимента применялись термометр спиртовой (17) со шкалой - $40..+40^{\circ}\text{C}$ и ценой деления 1°C и барометр-анероид (14) со шкалой 700..800 мм.рт.ст и ценой деления 1 мм.рт.ст. Для измерения времени эксперимента использовались электронные часы (8) с ценой деления 0,1 с.

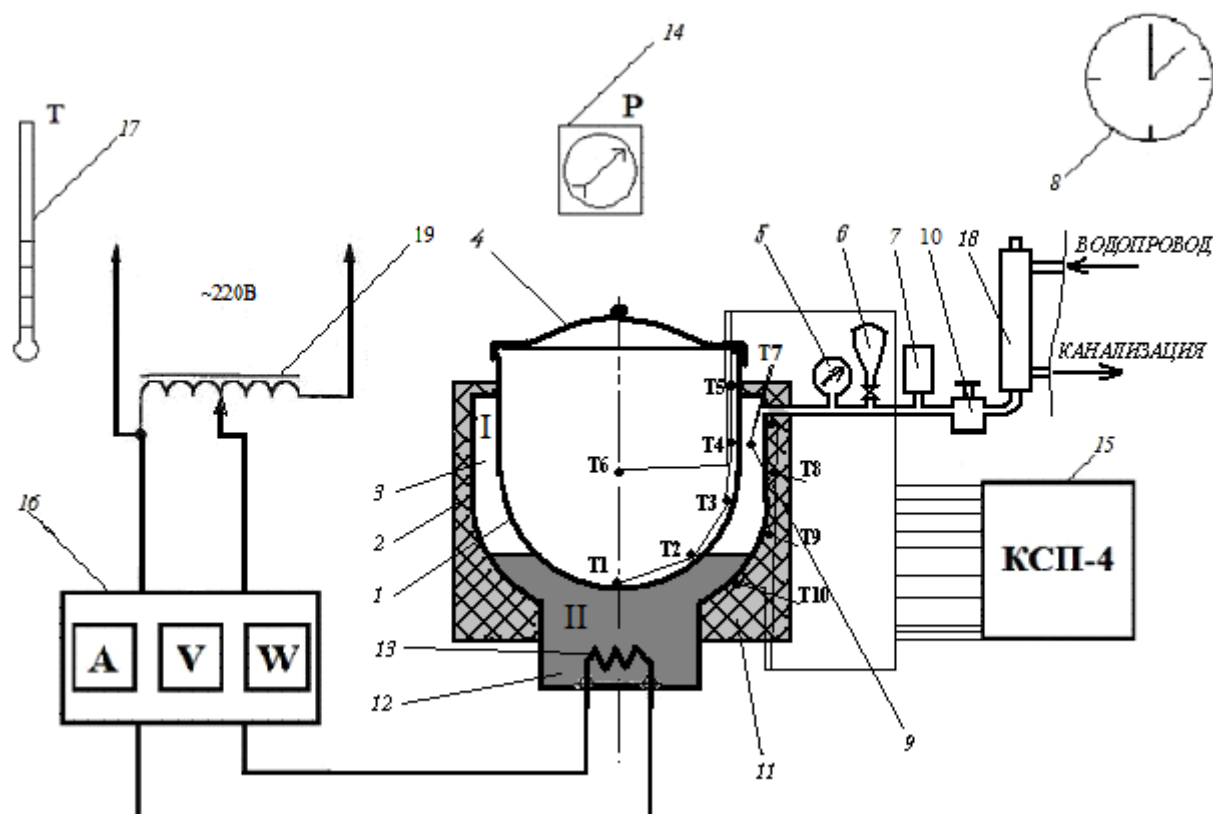


Рисунок 2 - Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования перспективных промежуточных теплоносителей:

1 – Варочный сосуд; 2 - Внешняя стенка пароводяной рубашки 3 - Внутреннее пространство рубашки котла; 4 - Крышка котла; 5 - Манометр, показывающий давление в рубашке котла; 6 - Заливная воронка с краном для выпуска воздуха; 7 - Предохранительный клапан. 8 - Секундометр; 9 – горячие спаи хромель-копелевых термопар (Т1-Т10); 10 – двухпозиционный кран; 11- тепловая изоляция; 12 - Теплоноситель; 13 - Нагревательный элемент (ТЭН); 14 - Барометр-анероид; 15 - Автоматический потенциометр-самописец КСП-4; 16 – Комплект измерительных приборов К505; 17 - Термометр спиртовой; 18 - Холодильник; 19 – Лабораторный автоматический трансформатор, регулируемый TDGC2-5k.

Методика эксперимента.

При проведении эксперимента составлялся тепловой баланс пищеварочного котла, работающего в режиме разогрева. Применялся принцип водяного эквивалента, то есть рабочей средой служила вода, имитирующая пищевой продукт. При испытаниях чистого

пропиленгликоля (концентрация 100%), применяемого в качестве теплоносителя для жарочного оборудования, в качестве рабочей среды применялось рафинированное подсолнечное масло марки «Злато».

В ходе эксперимента фиксировались значения температур рабочей жидкости (T1,T6), стенки варочного сосуда (T2-T5), а также ограждений греющей рубашки (T8-T10) и пара (T7) Измерялась продолжительность эксперимента; мощность, подводимая при разогреве, фиксировалась с помощью амперметра и вольтметра. Во время экспериментов с герметизированной греющей рубашкой фиксировалось так же давление внутри нее.

Варочный сосуд заполнялся рабочей средой не менее, чем на 70%. Греющая рубашка заполнялась в зависимости от типа эксперимента либо водой, либо водными растворами пропиленгликоля различной концентрации, либо чистым пропиленгликолем. Заполнение рубашки, в зависимости от типа эксперимента, варьировалось в интервале от 0,0015 м³, до 0,0035 м³. Заполнение всего объема рубашки теплоносителем позволило проверить его работоспособность в качестве однофазного теплоносителя, заполнение же рубашки теплоносителем частично, позволило испытать теплоноситель в качестве двухфазного, с двузонным изотермическим нагревом. При экспериментах с герметичной рубашкой перед герметизацией рубашки из нее предварительно выпускался воздух. Для этого перед предохранительным клапаном был установлен кран, который был открыт при включении котла и закрывался после того, как из крана начинался выход пара. В ряде экспериментов греющая рубашка котла не герметизировалась и сообщалась с атмосферой в течение всего эксперимента.

В начале исследования был проведен базовый эксперимент, в качестве теплоносителя в котором использовалась дистиллированная вода - промежуточный теплоноситель, применяющийся сегодня в пищеварочных котлах.

При проведении экспериментов, во время которых рубашка котла сообщалась с атмосферой, для предотвращения выкипания теплоносителя, его конденсации и стекания обратно в рубашку, применялся специально изготовленный холодильник. Холодильник представлял собой медный цилиндр, внутри которого располагалась герметично припаянная к цилиндру медная трубка, одним концом плотно прикрепленная к выходному отверстию рубашки, другой же конец трубки был открыт и сообщался с атмосферой. Между стенками цилиндра и трубки, проходя через отверстие в цилиндре, протекала

холодная вода, поступающая из городского водопровода и уходящая в канализацию через второе отверстие в цилиндре по гибкому шлангу.

В ряде экспериментов разогрев осуществлялся плавно, при изменении мощности от минимальной до максимальной при помощи включенного в цепь лабораторного регулируемого автотрансформатора (ЛАТР TDGC2-5k). В других экспериментах нагрев осуществлялся на неизменной мощности в течение всего времени эксперимента.

По полученным в ходе эксперимента значениям передаваемой теплоты Q и показателям температурных полей, исходя из значений коэффициента теплопередачи от теплоносителя к нагреваемой среде K , были вычислены коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{см}$ от теплоносителя к нагреваемой стенке

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (1),$$

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t \cdot \tau} \quad (2),$$

где F – площадь поверхности греющей рубашки варочного котла, m^2 ; Δt – средняя по времени разность температур греющего пара и нагреваемой среды; τ – продолжительность процесса, с.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{см}} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_{ж}}} \quad (3),$$

где $\alpha_{см}$ – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя (пара и кипящей жидкости) к стенке варочного сосуда, $Вт/м^2 \cdot К$

$\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки варочного сосуда к нагреваемой жидкости (пищевой среде), $Вт/(м^2 \cdot К)$; λ – коэффициент теплопроводности стенки варочного сосуда, $Вт/(м \cdot К)$; δ – толщина стенки, м.

Теплообмен между стенкой варочного сосуда и нагреваемой жидкостью подробно изучен (Натепров В.И., Груданов В.Я. и др.) и с погрешностью не более 5% описывается критериальным уравнением подобия $Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33}$,

где Nu – критерий Нуссельта, Gr – критерий Грасгофа, Pr – критерий Прандтля.

По полученным из данного соотношения значениям числа Нуссельта, аналитически определялся коэффициент теплоотдачи от стенки варочного сосуда к нагреваемой жидкости ($\alpha_{ж}$)

$$\alpha_{ж} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \cdot \lambda}{l} \quad (4),$$

где l – высота рубашки, м; $Gr = \frac{gl^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2}$; g — ускорение свободного падения; m/c^2 ;

t_c — температура поверхности теплообмена, К; t_0 — температура теплоносителя, К; ν — коэффициент кинематической вязкости, m^2/c ; β — температурный коэффициент объёмного расширения теплоносителя, $1/K$ $\alpha_{ж}$; Pr - число Прандтля; $Pr = \mu \cdot c_p / \lambda$; μ — коэффициент динамической вязкости нагреваемой жидкости, m^2/c ; c_p – удельная изобарная теплоемкость нагреваемой жидкости, Дж/кг·К.

Коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя (пара) к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ определялся из соотношения 3 по значениям коэффициента теплопередачи K и $\alpha_{ж}$. Результаты сравнительного анализа полученных значений K и $\alpha_{см}$, позволили сделать выводы о сопоставимости теплотехнических характеристик предложенных теплоносителей с аналогичными, используемыми в тепловой аппаратуре предприятий общественного питания, и соответственно, об их работоспособности и эффективности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования воды и водных растворов пропиленгликоля различной концентрации в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей и приведены результаты сравнение температурных полей, теплотехнических характеристик, времени разогрева и других наиболее важных параметров работы экспериментальной установки в зависимости от типа теплоносителя, давления в рубашки и степени заполнения рубашки теплоносителем. Были проведены экспериментальные исследования пяти видов промежуточных теплоносителей: воды, чистого пропиленгликоля (концентрация 100%), а также 48%, 55% и 80%-х водных растворов пропиленгликоля. Каждый теплоноситель исследовался как при максимальной мощности нагревательного элемента, так и при постепенном повышении мощности от минимальной до той, при которой пищевая среда в котле закипает.

Для подтверждения достоверности эксперимента был проведен базовый эксперимент с использованием в качестве промежуточного теплоносителя воды. Результаты эксперимента были сопоставлены с результатами, полученными в процессе исследования серийно выпускаемых пищеварочных котлов с косвенным обогревом, выполненного С.В. Шихалевым. Ниже на рисунках 3-6 представлены зависимости температуры жидкости в варочном сосуде, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от продолжительности разогрева для теплоносителей: воды, а также

55%, 80% водных растворов пропиленгликоля и чистого пропиленгликоля (концентрация 100%).

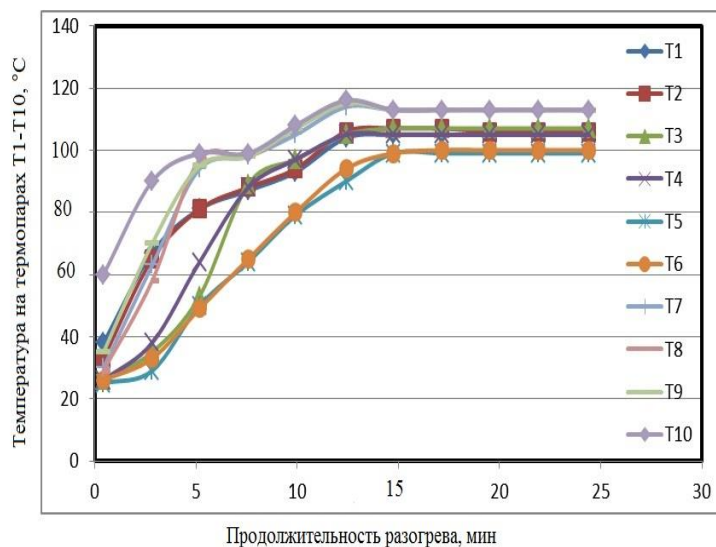


Рисунок 3 - Зависимости температуры жидкости в варочном сосуде (T1, T6), жидкого теплоносителя (T8, T10), стенки варочного сосуда (T2, T5) и пара (T7), от продолжительности разогрева для теплоносителя «вода»

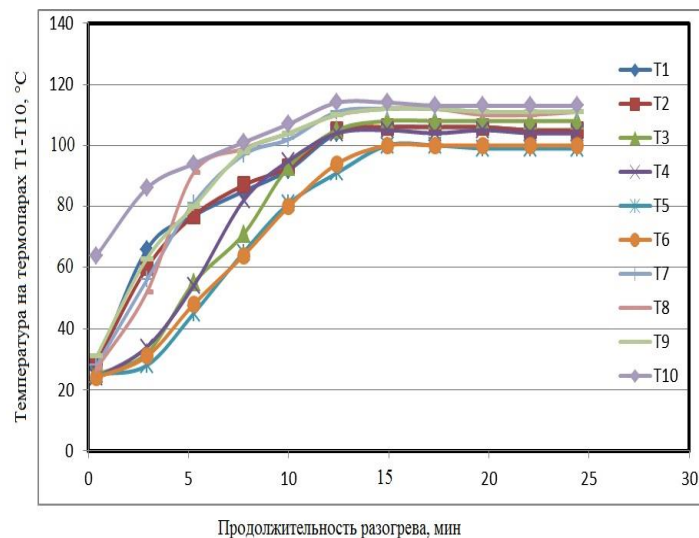


Рисунок 4 - Зависимости температуры жидкости в варочном сосуде (T1, T6), жидкого теплоносителя (T8, T10), стенки варочного сосуда (T2, T5) и пара (T7), от продолжительности разогрева для теплоносителя «55% водный раствор пропиленгликоля»

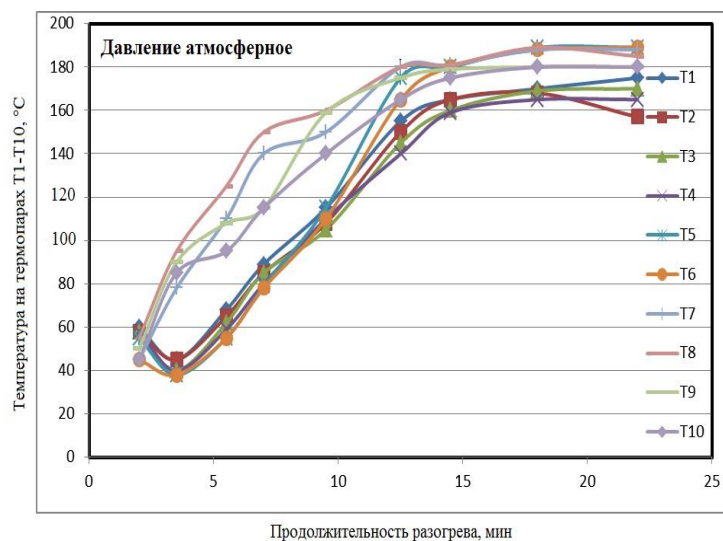


Рисунок 5 - Зависимости температуры жидкости в варочном сосуде (T1, T6), жидкого теплоносителя (T8, T10), стенки варочного сосуда (T2, T5) и пара (T7) от продолжительности разогрева для теплоносителя «80% раствор пропиленгликоля»

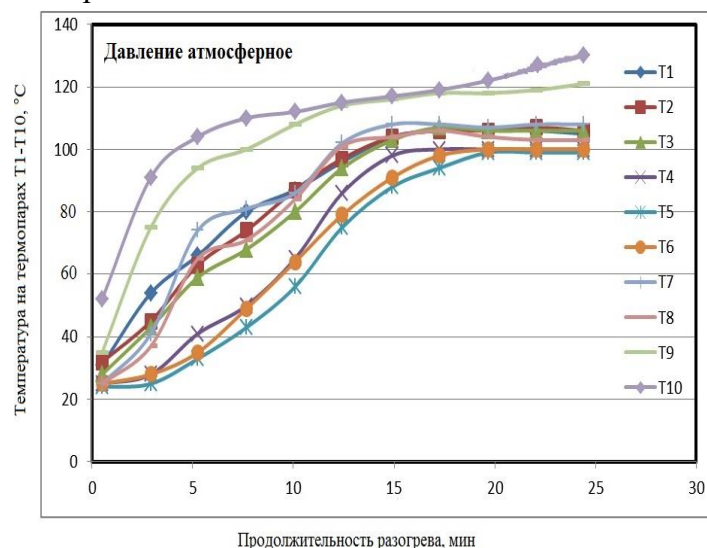


Рисунок 6 - Зависимости температуры жидкости в варочном сосуде (T1, T6), жидкого теплоносителя (T8, T10), стенки варочного сосуда (T2, T5), и пара (T7), от продолжительности разогрева для теплоносителя «100% пропиленгликоль»

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 4-6, можно сделать вывод о том, что продолжительность разогрева пищевой среды при использовании в качестве теплоносителя как воды, так и водного раствора пропиленгликоля практически не отличается. Это объясняется тем, что при более низкой по сравнению с водой теплоемкостью, водные растворы пропиленгликоля обладают меньшей плотностью, и соответственно, меньшей массой.

В пятой главе приведено сопоставление зависимостей коэффициентов теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_{см}$ и величины удельного теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$, а также зависимостей величины удельного теплового потока q от разности температур пара и стенки греющего сосуда Δt для базового эксперимента и эксперимента, выполненного при исследовании серийно выпускаемых котлов.

Удельный тепловой поток определялся из уравнения теплового баланса, по выражению

$$q = \frac{G \cdot c \cdot (t_{ж,i+1} - t_{ж,i}) + Q_{ном.}}{F \cdot \Delta \tau}, \quad (7)$$

Где: G – масса продукта, кг; c – удельная теплоемкость продукта, Дж/кг·К; F – площадь поверхности теплопередающей стенки, м²; $\Delta \tau$ – временной интервал, с; $t_{ж,i+1}$ – температура продукта в конце временного интервала, К; $t_{ж,i}$ – температура продукта в начале временного интервала, К; $Q_{ном}$ – потери теплоты аппаратом за временной интервал $\Delta \tau$, Вт. (Учитывались потери в окружающую среду и на разогрев конструкции аппарата).

Коэффициенты теплопередачи K от греющего пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см,\tau}$ и от стенки варочного сосуда к жидкости $\alpha_{ж,\tau}$ определялись по следующим соотношениям:

$$K = \frac{q}{t_{см,\tau} - t_{ж,\tau}}, \quad (8)$$

где $t_{см,\tau}$, $t_{ж,\tau}$, – соответственно температура основной массы пара и содержимого варочной емкости на временном интервале $\Delta \tau$, с.

$$\alpha_{см,\tau} = \frac{q}{t_{см,\tau} - t_{ex}}, \quad (9)$$

где t_{ex} , – температурное поле внутренней поверхности варочной емкости на интервале $\Delta \tau$, с.

$$\alpha_{ж,\tau} = \frac{q}{t_{in} - t_{ж,\tau}} \quad (10)$$

где t_{in} , - температурное поле наружной поверхности варочной емкости на интервале $\Delta\tau$,
с.

Зависимости, полученные при сопоставлении результатов вышеупомянутых исследований с результатами установочного эксперимента, представлены на рисунках 7-9.

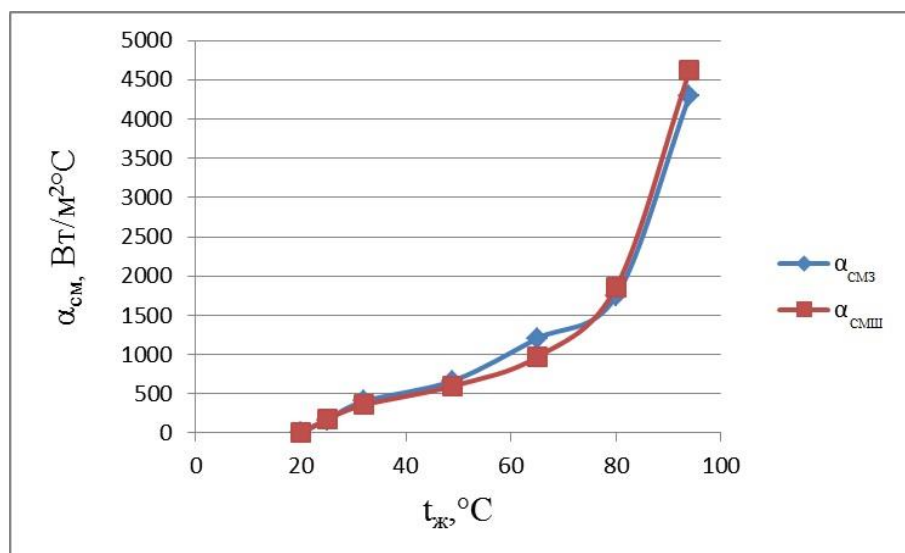


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителя «вода»: $\alpha_{смЗ}$ — результат установочного эксперимента, $\alpha_{смШ}$ — результат исследования серийных котлов (Груданов В.Я., Минухин Л.А., Шихалев С. В.)

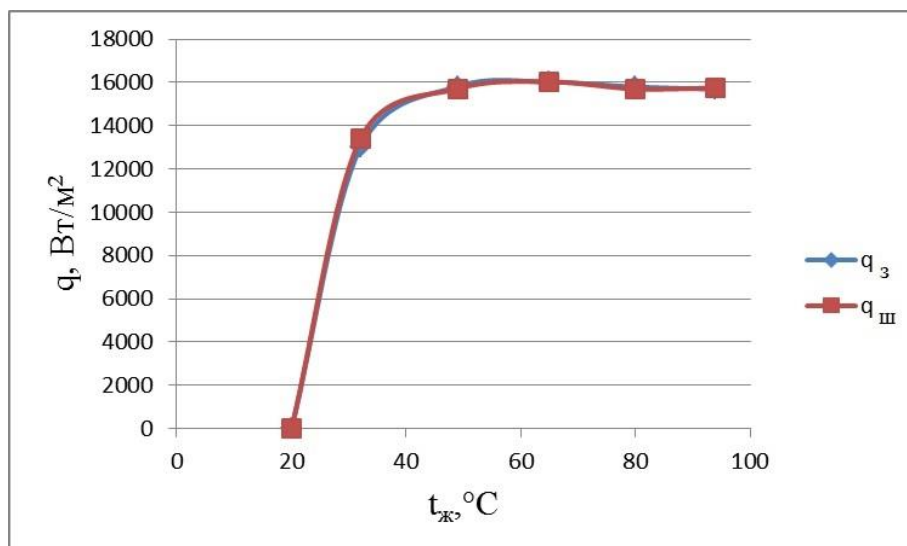


Рисунок 8 - Зависимость величины удельного теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителя «вода»: $q_з$ – результат установочного эксперимента, $q_{ш}$ – результат исследования серийных котлов (Минухин Л.А., Шихалев С.В)

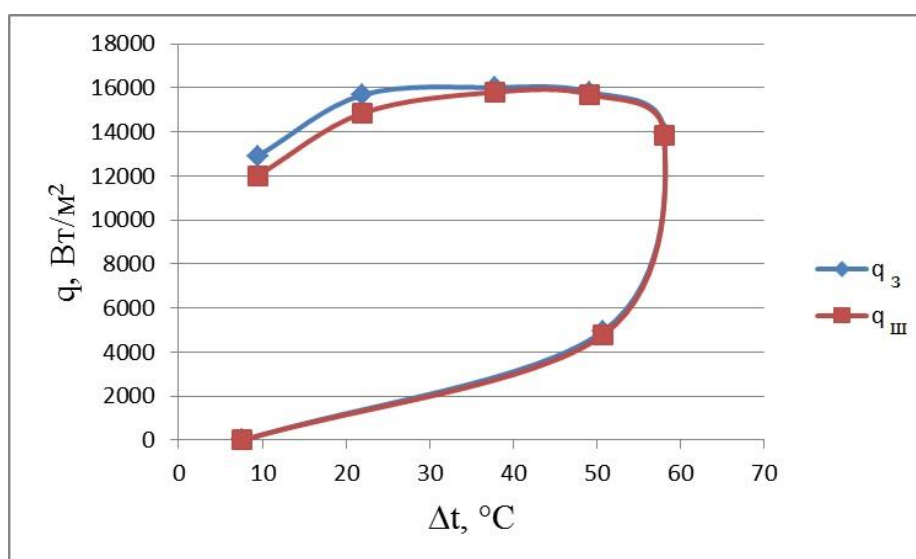


Рисунок 9 - Зависимость величины удельного теплового потока q от разницы температур парогазовой меси и стенки варочного сосуда Δt для теплоносителя «вода»: $q_з$ – результат установочного эксперимента, $q_{ш}$ – результат исследования серийных котлов (Минухин Л.А., Шихалев С.В.)

Из приведенных на рисунках 7-9 зависимостей видно, что коэффициенты теплоотдачи и величины теплового потока весьма близки к совпадению, как в вышеупомянутом исследовании, так и в установочном эксперименте. Расхождение зависимостей не превышает 5%, что сопоставимо с погрешностью эксперимента. Схожесть значений зависимостей этих величин позволяет сделать вывод, что данные, полученные в ходе установочного эксперимента, в котором в качестве промежуточного теплоносителя использовалась дистиллированная вода, достоверны.

При применении указанной выше расчетной методики, получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_{см}$ и величины удельного теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$, а также зависимости величины удельного теплового потока q от разности температур пара и стенки греющего сосуда Δt для эксперимента, в котором в качестве промежуточного теплоносителя был использован 55% водный раствор пропиленгликоля. Данная концентрация раствора был признана оптимальной для варочного оборудования предприятий питания по результатам аналитического исследования температуры кипения, приведенного в первой главе. На рисунках 10-12 представлены сопоставленные зависимости указанных выше величин для установочного эксперимента и эксперимента, в котором в качестве промежуточного теплоносителя был использован 55% водный раствор пропиленгликоля.

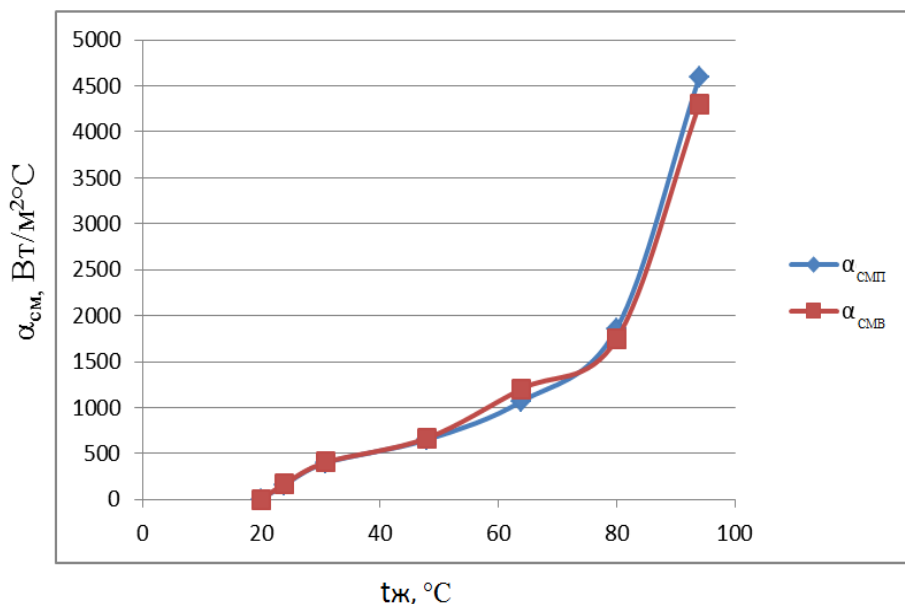


Рисунок 10 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей «вода» ($\alpha_{смВ}$) и «55% раствор пропиленгликоля» ($\alpha_{смП}$)

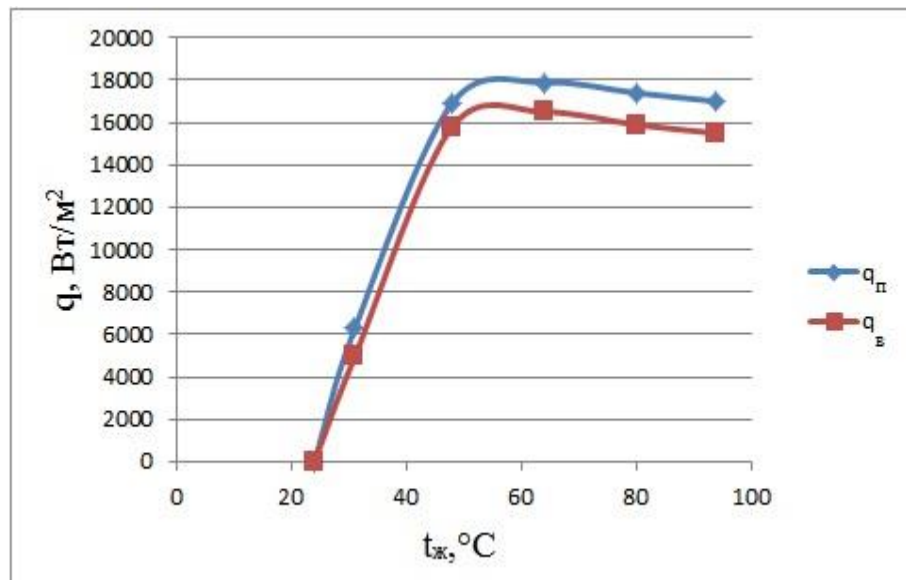


Рисунок 11 - Сравнительные зависимости величины удельного теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей «вода» ($q_в$) и «55% раствор пропиленгликоля» ($q_п$)

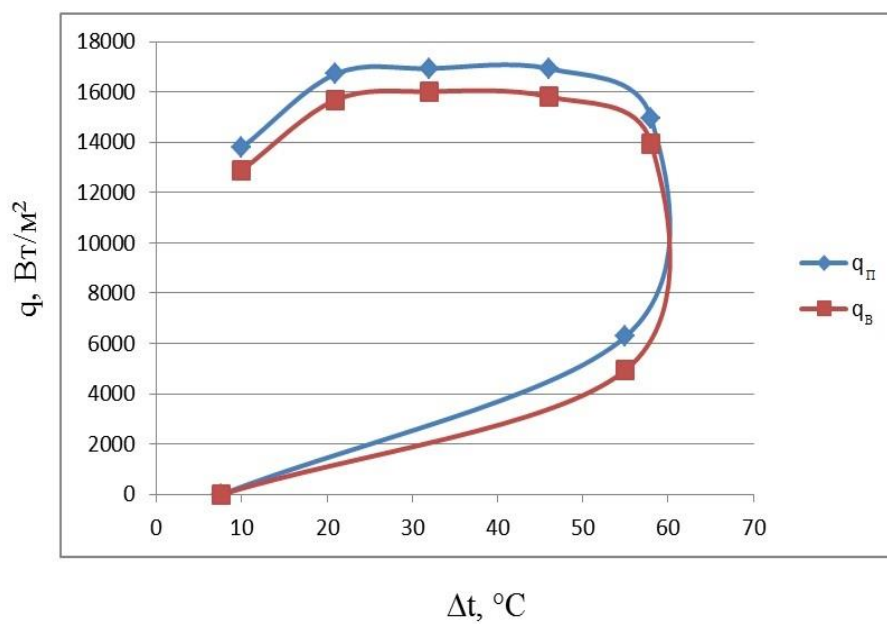


Рисунок 12 - Зависимость величины удельного теплового потока q от разницы температур парогазовой меси и стенки варочного сосуда Δt для теплоносителей «вода» ($q_в$) и «55% раствор пропиленгликоля» ($q_п$)

Зависимости на рисунках 10-12, полученные для коэффициентов теплоотдачи и тепловых потоков для теплоносителей «вода» и «55% раствор пропиленгликоля» сохраняют совпадающие тенденции и близки по абсолютным значениям. По сравнительным кривым можно сделать вывод о применимости приведенной методики для расчетов коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, а также величины тепловых потоков для теплоносителей на основе водных растворов пропиленгликоля. Исходя из схожести абсолютных значений коэффициентов теплоотдачи и величин тепловых потоков в сопоставленных экспериментах, можно сделать положительный вывод о возможности применения водных растворов пропиленгликоля в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей в тепловом технологическом оборудовании предприятий общественного питания.

Также приведены расчеты коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, величин теплового потока при использовании чистого пропиленгликоля в качестве однофазного теплоносителя в жарочном оборудовании предприятий питания с косвенным обогревом. Представлены результаты технологических испытаний и рассчитан экономический эффект от применения водных растворов пропиленгликоля в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей в тепловом технологическом оборудовании предприятий общественного питания.

Экономические выгоды от применения в качестве промежуточных теплоносителей водных растворов пропиленгликоля, а также чистого пропиленгликоля заключаются в следующих аспектах:

1. Снижения металлоемкости пищеварочных котлов за счет уменьшения толщины стенок греющей рубашки и пищеварочного сосуда, так как при использовании водных растворов пропиленгликоля давление в рубашке снижается на 50-100%. При снижении металлоемкости понижается масса оборудования, что влечет за собой экономию топлива, используемого транспортом для передвижения мобильных предприятий питания, а также уменьшения расхода теплоты на разогрев конструкции аппарата. По результатам расчетов, приведенных в диссертации, годовая экономия при выпуске пищеварочных котлов объемом варочной емкости в 10 литров может достигать 2237 тысяч рублей в, при годовом выпуске 6000 штук.
2. Использовании одного вида теплоносителя в разных концентрациях как в системе жидкостного отопления, так и в варочном и жарочном оборудовании

передвижных предприятий питания, что снижает номенклатуру закупаемых теплоносителей. Изменение концентрации раствора достигается путем разбавления теплоносителя водой.

3. Возможность предварительного нагрева теплоносителя в системе жидкостного отопления мобильных предприятий питания для последующего его использования в варочном оборудовании, что исключает энергетические затраты на разогрев теплоносителя, которые всегда присутствуют в рубашечных пищеварочных котлах, использующих в качестве промежуточного теплоносителя обычную воду.

По результатам технологических испытаний экспериментального стенда были сделан вывод о том, что полученные опытно-расчетные данные позволяют заключить, что при применении перспективных двухфазных теплоносителей на основе водных растворов пропиленгликоля в варочном и жарочном оборудовании предприятий питания достигается значимый экономический эффект при сохранении органолептических и биохимических свойств приготовляемого продукта. Так же предложенные теплоносители позволяют использовать один аппарат с греющей рубашкой, как для жарки, так и для варки пищевого продукта.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ теплового кулинарного оборудования с косвенным обогревом, используемого на предприятиях общественного питания. Анализ показывает необходимость создания мягкого косвенного обогрева при относительно интенсивном нагреве нижней части рабочей камеры и менее интенсивном нагреве ее стенок, для чего предлагается использовать водные растворы, работающие в условиях температурной депрессии.

2. Рекомендованы концентрации водных растворов пропиленгликоля для варочного (концентрация 48-55%) и жарочного (концентрация 80-100%) оборудования, аналитически определены теплоемкость, теплопроводность, кинематическая вязкость, температуры кипения и кристаллообразования и их зависимости от температуры для данных теплоносителей.

3. Исследован теплообмен в рубашке электрического пищеварочного котла и получены расчетные значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи от греющего пара к стенке пищеварочного сосуда и от стенки пищеварочного сосуда к рабочей жидкости в зависимости от величины теплового потока и температуры для указанных водных растворов пропиленгликоля.

4. Экспериментально подтверждена возможность использования существующей методики расчета водяных паровых теплообменников для расчета поверхности нагрева теплообменников, использующих в качестве промежуточного теплоносителя водные растворы пропиленгликоля.

5. Проведены технологические испытания, подтвердившие работоспособность теплового технологического оборудования с применением в качестве промежуточного теплоносителя водных растворов пропиленгликоля, при сохранении высоких органолептических качеств приготовленной на этом оборудовании пищевой продукции.

6. Определена экономическая эффективность применения теплоносителей на основе водных растворов пропиленгликоля в оборудовании предприятий общественного питания, вызванная сокращением материалоемкости, снижением сложности изготовления теплового оборудования, возможностью использования одного технологического аппарата как для варки, так и для жарки во фритюре в

зависимости от концентрации промежуточного теплоносителя, а следовательно возможностью приготовления более широкого ассортимента блюд, а также повышением уровня безопасности персонала предприятий питания.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Зиборов. Д.М. Совершенствование мобильных предприятий питания / Д.М. Зиборов // Наука и бизнес: пути развития. - 2014 –№ 9. - С. 67-70.
2. Зиборов Д.М. Экономический эффект от совершенствования мобильных предприятий питания / Д.М. Зиборов // Вестник РЭУ. - 2014 - №9. - С. 114-122.
3. Зиборов Д.М. Обоснование методики расчета теплотехнических характеристик перспективных универсальных теплоносителей / Д.М. Зиборов // Наука и бизнес: пути развития. – 2014 - №10. - С. 33-37.

Тезисы докладов на научно-практических конференциях

1. Зиборов Д.М. Пропиленгликоль и его водные растворы - перспективный универсальный двухфазный промежуточный теплоноситель. Актуальні проблеми розвитку харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі : Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (25 квітня 2013 року) Ч. 1.- Харьков: ХДУХТ, 2013
2. Зиборов Д.М., Ботов М.И. Пропиленгликоль и его водные растворы – перспективный универсальный двухфазный промежуточный теплоноситель. Липатовские чтения. Сборник трудов кафедры технологических машин и оборудования – М.: Изд-во. РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2014. – 153 с.
3. Зиборов Д.М. Расчет теплотехнических характеристик растворов некоторых веществ. Экономические проблемы внедрения и использования нанопродуктов и нано-технологий: сб. тез. докл. Участников. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием; 30 ноября 2011 года. - М.: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2012

Статьи

1. Зиборов Д.М. Расчет теплотехнических характеристик растворов некоторых веществ / Ботов М.И., Зиборов Д.М. // Труды инженерно-экономического факультета. Выпуск 7. М.: Изд-во. Россельхозакадемии, 2012. -353 с.
2. Вывод дифференциального уравнения для определения формы равновесного слоя на вращающемся цилиндре и его решение / Зиборов Д.М., Кулаго А.Е., Мерзликин В.Г. и др. // Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: сборн. трудов II междунар. науч.- практ. конф. – Москва, 2016. - С. 249-257.

Монографии

1. Зиборов Д.М. Совершенствование теплового оборудования предприятий общественного питания на основе использования перспективных теплоносителей: Монография. – М.: АНСБ, 2016. - 64 с.