

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»

На правах рукописи

Зиборов Дмитрий Михайлович

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

05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, профессор
Ботов Михаил Иванович

Москва – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Современное состояние вопроса в области конструирования тепловых аппаратов с греющей рубашкой.....	11
1.1 Требования, предъявляемые к рубашечным аппаратам технологией приготовления продуктов питания.....	11
1.2 Анализ конструкции существующих пищеварочных аппаратов рубашечного типа.....	18
1.3 Тепловые процессы, протекающие в рубашечных пищевых аппаратах.....	24
1.4 Двухфазные теплоносители, применяемые на сегодняшний день в пищеварочных котлах.....	26
1.5 Постановка цели и задач исследования.....	30
2. Аналитическое исследование промежуточных теплоносителей.....	31
2.1 Расчет теплотехнических характеристик перспективных промежуточных теплоносителей.....	31
2.2 Выбор исследуемого перспективного теплоносителя.....	42
3. Методика проведения экспериментов и экспериментальный стенд.....	47
3.1 Экспериментальный стенд.....	47
3.2 Методика эксперимента.....	50
4. Экспериментальные данные, их обработка и обобщение.....	54
5. Исследование и сопоставление процессов разогрева с применением перспективных теплоносителей.....	70
5.1 Проверка достоверности экспериментов.....	70
5.2 Исследование коэффициентов теплоотдачи.....	74
5.3 Экономический эффект от применения перспективных промежуточных теплоносителей.....	81
5.4 Результаты технологических испытаний.....	85

Выводы.....	89
Список литературы.....	91
Приложение А.....	108
Приложение Б.....	113

ВВЕДЕНИЕ

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 промежуточным 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 [140]. 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 $197^\circ C$ и $188^\circ C$ 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 [47, 82, 83, 84]. В исследовании [131] 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 [81], 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 двухзонный (изотермический в

каждой зоне) обогрев стенок рабочих камер, исключая 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 Groen, 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 двухзонный обогрев стенок рабочих камер, исключая 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 нанопродуктов и нанотехнологий», 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 8 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации».

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.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ АППАРАТОВ С ГРЕЮЩЕЙ РУБАШКОЙ.

1.1 Требования, предъявляемые к рубашечным аппаратам технологией приготовления продуктов питания.

Варка продуктов в пищеварочных котлах является основным приемом тепловой обработки. Нагрев продукта и доведение его состояния до кулинарной готовности осуществляется при атмосферном, избыточном и пониженном давлениях. Эти давления обуславливают температурные уровни технологического процесса. Для высококачественного технологического процесса необходима разность температур между стенкой варочного сосуда и продуктами, не превышающая 5-10°C.

При этом длительность тепловой обработки зависит от вида обрабатываемого продукта и должна быть такой, чтобы обеспечить необходимые органолептические свойства готового блюда. Кроме того, температурное поле в жидкой нагреваемой среде должно быть равномерным по всему ее объему, что обуславливается равномерностью температурного поля на греющей поверхности, а это, в свою очередь, достигается применением косвенного обогрева варочного сосуда и его надлежащей формой.

Таким образом, необходимо чтобы пищеварочный котел обеспечивал быстрый нагрев содержимого до состояния кипения, равномерное температурное поле по всему объему варочного сосуда и на его греющей поверхности, разность температур между греющей и нагреваемой средами порядка 5-10°C, четкую регулируемость и малую инерционность теплового режима.

На всех этапах ведения технологического процесса необходимо, чтобы пищеварочный котел создавал надлежащие температурные условия, которые являются определяющими для получения высококачественной пищи. Поэтому

при конструировании котлов, отвечающих вышеизложенным требованиям, необходимо учитывать влияние, оказываемое тепловой обработкой на изменение свойств пищевых продуктов [47].

В процессе обработки различные продукты подвергаются обезвоживанию. Так, например, при варке различных сортов мяса теряют около 40%, а различные виды рыб около 25% воды, содержащейся в продукте. При этом размер водопотери находится в зависимости от температуры, а также от времени воздействия температуры [42, 58]. В овощах вода сохраняется, а в картофеле, являющемся клубнекорнеплодом, поглощается клейстеризующим крахмалом. При припускании, тушении и жарении содержание воды значительно уменьшается, и часть ее замещается жиром. При варке предварительно замоченных бобовых и круп содержание воды почти не меняется, так как происходит перераспределение ее между белками и крахмалом. Крахмал, клейстеризуясь, поглощает воду из свертывающихся белков.

Под действием теплоты происходит выщелачивание из продуктов минеральных веществ. В процессе этого ключевое значение имеет температура варки. Необходимо добиться такой температуры кипения, которая обеспечивала бы доведение продукта до состояния готовности наиболее быстро, а также высокую степень уплотнения белка при сопутствующем выделении воды и некоторых растворимых веществ (сахара, азотные и минеральные вещества, пектин, глюкозиды и кислоты), в результате разрушений связи между клетками, что обеспечивает минимальными температурными перепадами между стенкой варочного сосуда и содержимым [32].

При тепловой обработке мяса, птицы, рыбы растворимые мышечные белки постепенно, по мере прогревания продукта до 60..70°C, денатурируются (делаются нерастворимыми и набухают). В этом интервале температур 90% белков изменяют свое коллоидное состояние [121].

Температурный интервал от 70 до 95..100 °C не вызывает полной денатурации белков. Денатурация белков проявляется в уплотнении белкового

геля внутри мышечных волокон с выделением значительной доли содержащейся в нем воды с растворимыми в ней азотистыми и минеральными веществами. Мышечные волокна мяса сокращаются при этом на 12..16% от первоначальной длины [130].

Образующийся при варке мяса концентрированный золь коагулирует с выделением хлопьев свернувшегося миогена, образующих пену, которая удаляется фильтрованием. При этом часть его белков подвергается слабому гидролитическому расщеплению, в результате чего в химическом составе бульона обнаруживается некоторое количество альбумоз. Здесь необходим быстрый нагрев содержимого. Небольшое набухание мяса и рыбы происходит за счет действия тепловой обработки на пучки коллагеновых волокон, из которых состоит эндомизия и перемизия мяса и рыбы. При температуре 60 °С (а для рыбы 40 °С) длина начнет сокращаться, а толщина увеличивается и начинается гомогенизация, то есть нарушение фибриллярной структуры и превращение в однородную стекловидную массу. При дальнейшем повышении температуры сваривание коллагеновых волокон сопровождается отщеплением и переходом в раствор значительной части полисахаридов, после чего происходит разрыв всех поперечных связей между полипептидными цепочками коллагена [121]. Это приводит к необратимой дезагрегации коллагена и превращения его в глютин, хорошо растворимый в воде. Чем продолжительнее тепловая обработка мышечной ткани, тем выше процент коллагена, переходящего в глютин. При удлинении срока варки на 20 минут, количество образовавшегося глютина увеличивается в 2 раза, что нежелательно. Поэтому пищеварочный котел должен обеспечить быстрый разогрев рабочей среды до состояния кипения, а в процессе варки необходима четкая регулируемость теплового режима, способная после закипания рабочей среды обеспечить переход аппарата в режим «тихого» кипения, при котором перегрев жидкости достигает 5-8 °С

В результате перехода коллагена в глютин уменьшается прочность прослоек перемизии и ослабляется связь между пучками мышечных волокон, происходит

разрушение соединительной ткани, приводящее к общему изменению структуры мяса.

Чем выше температура варки, тем быстрее коллаген переходит в глютин, но только при воздействии одновременно влаги на коллаген. При этом температура стенки варочного сосуда должна быть равномерной по всему объему, что достигается применением косвенного обогрева и оптимальными размерами котла. Даже при надлежащих температурах тепловая обработка приводит к снижению витаминной ценности мяса: на 30..60% снижается содержание тиамина, на 15..30% - пантотеновой кислоты, на 10..35% - никотиновой кислоты и других веществ. Этот процент резко увеличивается при несоблюдении требуемых температурных условий [42].

При нагреве молока происходит денатурация его белков (казеина, лактальбумина, лактоглобулина). Денатурированный альбумин свертывается и оседает на дне и стенках посуды. Нагрев вызывает изменение казеина и превращение его в золь. Тепловая обработка овощей и фруктов вызывает свертывание белков в протоплазме и в клеточном соке с образованием хлопьев. При коагуляции протоплазмы кожистый слой ее разрушается и исчезает препятствие для диффузии веществ клеточного сока через клеточные оболочки [42].

Крахмал (углеводы) при нагреве подвергается ферментативному расщеплению. В зависимости от количества воды, получающийся клейстер имеет характер золя или геля. Крахмальные золи различной вязкости служат основой для киселей, соусов, супов. Прочные гели (6..8% крахмала) служат основой для желе, каш и других продуктов питания.

Растворение амилозы и пептизация амилопектина в процессе клейстеризации крахмала является основной причиной значительного увеличения водорастворимых веществ в крахмалосодержащих продуктах. Очень важно, чтобы температура в слоях, прилегающих к греющей поверхности, не превышала 100 °С, так как в противном случае наблюдается обезвоживание и пригорание каш

в результате сухого нагрева крахмала. При этом следует учитывать равномерность прогрева консистентных продуктов (каш), чтобы обеспечить одинаковые изменения по всему объему [47].

Жиры растительного и животного происхождения представляет собой смеси сложных эфиров (триглицеридов) глицерина и различных насыщенных и ненасыщенных жирных кислот. Свойства глицеридов зависят от химического состава образующих их жирных кислот (капроновой, линоленовой, пальмитиновой, стеариновой, линолевой, лауриновой, арахидоновой, олеиновой и других). Пищевая ценность жира обуславливается его усвояемостью и содержанием высоконепредельных жирных кислот. Характер и степень изменения жиров при приготовлении пищи зависит от температуры и продолжительность нагрева, величины поверхности соприкосновения жира с водой и от наличия веществ, которые способны вступить в химическое взаимодействие с жиром [42]. В процессе варки жир, содержащийся в продукте, плавится. Плавление жира происходит при температурах 36..52 °С в зависимости от сорта. Происходит частичный переход жира в воду. Мясо теряет при варке до 40% жира, рыба – до 14% ; при этом основная часть жира остается на поверхности, а небольшая – эмульгируется [130].

Эмульгированный жир придает бульону мутность, поэтому нужна кратковременная тепловая обработка с равномерным распределением температур по всему объему содержимого, что обеспечивается в первую очередь косвенным обогревом варочного сосуда. В противном случае при эмульгировании жира создаются благоприятные условия для его расщепления, в результате которого образуются стеариновые и пальмитиновые кислоты, придающие бульону неприятный привкус.

При варке жир эмульгируется в зависимости от интенсивности кипения, которая определяется температурой греющей поверхности и соотношением количества воды и продукта. Интенсивность кипения оказывает особенно сильное

влияние при большом соотношении (7:1) между количеством воды и продукта [47].

Таким образом, учитывая вышеописанные изменения в структуре пищевых продуктов, для получения наилучшего теплового технологического режима, обеспечивающего сохранение минеральных веществ и витаминной активности, необходимо:

1. Быстрое доведение содержимого до кипения, благодаря чему сокращается время приготовления одной порции пищевого продукта, а значит, увеличивается количество порций пищевого продукта, приготовляемого за смену, вследствие чего растет экономическая эффективность аппарата

2. Создание равномерного, мягкого, косвенного обогрева, что позволяет добиться равной степени готовности пищевого продукта по всему объему варочного сосуда, а также избежать пригорания пищевого продукта, в особенности соусов, к внутренней поверхности пищеvarочного сосуда.

3. Четкое и безынерционное регулирование теплового режима, что позволяет добиться приготовления различных видов блюд в одном аппарате, а также повысить энергетическую эффективность благодаря регулировке количества подводимой энергии в зависимости от режима работы аппарата.

Соблюдение второго условия обуславливает отсутствие местных перегревов при минимальном температурном перепаде между греющей поверхностью и обогреваемой средой.

Косвенный равномерный и легко регулируемый обогрев достигается применением теплоносителя, находящегося в греющей полости в парообразном состоянии. Для быстрого выхода на стационарный режим разогрева пищеварочный котел должен иметь экономичный и достаточно мощный генератор теплоты, способный работать на нескольких температурных режимах. Если применяется электрообогрев, генератор теплоты обычно состоит из нескольких ТЭНов, которые при доведении рабочей среды до кипения работают все одновременно, а в стационарном режиме работы до 80% ТЭНов отключается.

Требования, предъявляемые к жарочным аппаратам рубашечного типа, во многом совпадают с требованиями, предъявляемыми к варочным аппаратам с косвенным обогревом:

1. Быстрое доведение жарочного аппарата до рабочей температуры, зависящей от типа приготовляемого продукта, что обеспечит экономическую эффективность аппарата.

2. Создание равномерного температурного поля по всему объему жарочной емкости в случае применения фритюрниц с косвенным обогревом, что обеспечит равномерную прожарку всего объема загруженного пищевого продукта.

3. Четкое и безынерционное регулирование теплового режима, что позволяет добиться возможности жарки различных видов пищевых продуктов в одном аппарате, а также повысить энергоэффективность благодаря регулировке количества подводимой энергии.

Так же, как к варочным, так и к жарочным рубашечным аппаратам, как и ко всем тепловым аппаратам предприятий общественного питания, предъявляются следующие требования:

- Обеспечение тепловой обработки, при которой потери пищевого жира и самого продукта минимальны, при этом обработка должна занимать как можно меньшее время.
- Работа аппаратов в энергосберегающем режиме, на основании регулировки количества подводимой энергии.
- Удобство и простота обслуживания аппаратов при полной безопасности персонала.
- Минимальная масса и размер аппаратов при заданной производительности и высоком качестве продукции.
- Надежность и долговечность аппаратов при минимальной стоимости конструкционных материалов.
- Отсутствие в атмосферу выбросов, вредных для человека, животных и растений.

- Высокая степень автоматизации технологических процессов и как следствие – высокая экономическая эффективность аппаратов.

1.2 Анализ конструкции существующих пищеварочных аппаратов рубашечного типа.

Пищеварочные котлы относятся к варочным аппаратам периодического действия. Наиболее значимый признак, который существенно влияет на конструкцию пищеварочных котлов, - вид обогрева пищеварочного сосуда, а также вид энергии, применяемой для разогрева.

Теплообмен в греющих рубашках пищеварочных котлов, а так же других варочных аппаратах с косвенным обогревом двухфазными теплоносителями, происходит в специфических условиях: наличие малого замкнутого объема, представляющего собой кольцевую цилиндрическую щель, движение в это щели генерируемого парогенератором пара навстречу конденсатной пленке, в ряде случаев предварительное вакуумирование рубашки; переменность физических констант пленки и пара при изменении удельной тепловой нагрузки, определяющем изменение давления в замкнутой рубашке, различные положения поверхности конденсации в пространстве. Кольцевая щель накладывает определенные условия на взаимодействие пара с пленкой, влияя на скорости их движения и коэффициент трения между паром и пленкой.

Для обеспечения равномерного нагрева продукта используют рубашечные аппараты с промежуточным теплоносителем. Схема такого котла представлена на рисунке 1.1.

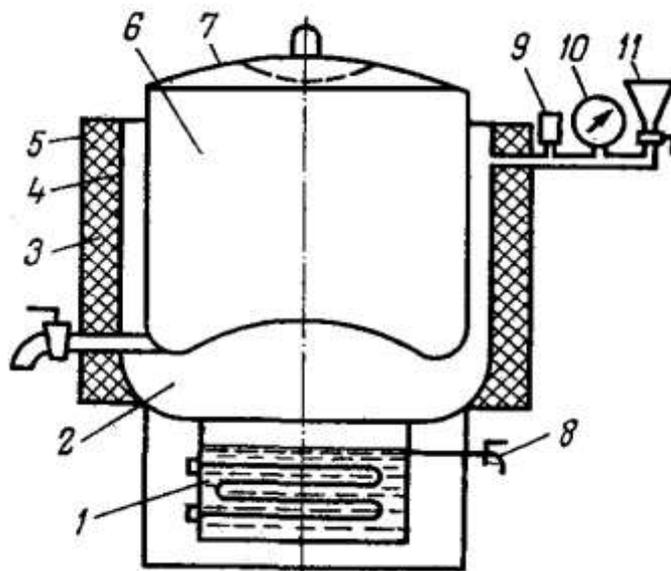


Рисунок 1.1. - Конструктивная схема варочного котла с косвенным обогревом:

1- Парогенератор; 2-Пароводяная рубашка; 3- Тепловая изоляция;4- Корпус (наружный котел); 5- Кожух; 6- Варочный сосуд; 7- Крышка котла; 8- Кран уровня; 9- Двойной предохранительный клапан; 10- Манометр; 11- Наполнительная воронка;

Рубашка пищеvarочного котла является герметичным объемом, примыкающим к внешней стороне поверхности обогрева. Теплоотдающая среда, в качестве которой применяется пар различных жидкостей, поступает в рубашечное пространство и образует конденсат на стенках варочного сосуда. Выделяющаяся в процессе этого скрытая теплота конденсации передается сквозь стенку пищеvarочной емкости и обеспечивает необходимую тепловую обработку продукта. В пищеvarочных котлах с косвенным обогревом пар вырабатывается в парогенераторе, непосредственно примыкающем к варочной рубашке.

В зависимости от вида источников энергии, применяющихся для производства пара в парогенераторе котла, пищеvarочные котлы делятся на твердотопливные, газовые и электрические. Наиболее широкое применение при

обработке продуктов тепловыми методами на предприятиях питания и пищевой промышленности на сегодняшний день получила электрическая энергия. Также известны конструкции тепловых аппаратов с косвенным обогревом, которые используют энергию, выделяющуюся в процессе сгорания топлива. Отнести к подобному оборудованию можно по большей части варочные аппараты газового обогрева, твердотопливные же - значительно реже. В настоящее время существуют аппараты, работающие на торфе, дровах или угле, которые применяются для организации питания населения в малодоступных районах страны, применяются в сельском хозяйстве при обработке кормов высокой температурой [32].

В качестве основных элементов конструкции рассматриваемых в работе пищевых аппаратов можно выделить пищеварочный сосуд и варочную рубашку. Схемы конструкций пищеварочных сосудов, которые применяются в рубашечных пищеварочных котлах, отличаются большим разнообразием. Наиболее широкое распространение получили цилиндрические варочные сосуды вертикального расположения, днище которых выполнены в виде полусферы или эллипса. Такая конструкция варочной емкости используется в варочных котлах серии КПЭ отечественного производства и многих других отечественных и иностранных производителей, широко применяемых сегодня на предприятиях общественного питания. В конструкции варочного котла дно может быть как выпуклым, так и вогнутым.

На сегодняшний день существуют пищеварочные котлы, у которых варочные сосуды представляют собой прямоугольные емкости как с выпуклыми, так и с вогнутыми днищами. Применяются и конструкции с плоским дном. Широкое применение нашли рубашечные аппараты с варочными емкостями, выполненными в форме полусферы.

Разнообразны и конструкции тепловых рубашек варочных емкостей. Обычно, конструктивные формы рубашек подразделяют на цилиндрические и прямоугольные.

Между стенками варочной емкости и тепловой рубашки образуются щелевые каналы либо кольцевой формы (в случае с цилиндрическими рубашками) либо плоские щелевые каналы (рубашки прямоугольной формы). В пищеварочных котлах типа КЭ тепловая рубашка и пищеварочный сосуд изготовлены из единой детали – листоканальной ленты, являющейся сварным соединением двух полос: полоса, находящаяся снизу формирует боковые стенки и днище пищеварочной емкости, а полоса, находящаяся сверху, формирует тепловую рубашку котла. Циркуляция пара в таких рубашках осуществляется по отдельным вертикальным каналам. Преимуществами тепловых аппаратов с канальными рубашками перед аппаратами с каналами кольцевой формы являются повышенные эксплуатационные и экономические характеристики, такие как пониженная металлоемкость, а также малое время разогрева.

Также существуют пищеварочные емкости с греющей рубашкой, созданной в виде отдельных каналов. В таких котлах на внешнюю поверхность варочного сосуда навариваются уголки или спиралеобразные половинки стальных трубок, образующие каналы. Основным преимуществом этой конструкции является то, что теплоотдающая среда находится в непосредственном контакте со стенкой нагреваемой емкости.

Хорошо известны конструкции рубашек с анкерными связями, в которых благодаря принудительному распределению теплоносителя тонким слоем по значительной площади процессы теплообмена приближены к аналогичным процессам в пластинчатых теплообменниках. Применение подобных рубашек снижает металлоемкость, улучшает технологичность производства, а также упрощает конструкцию аппаратов.

Сегодня на конструкторских предприятиях нашей страны создан и защищен авторским свидетельством пищеварочный котел, в котором предусмотрена вертикальная цилиндрическая обечайка, которая установлена с зазором между своими краями и верхней кромкой корпуса и ее днищем [136]. Использование котлов подобного типа, если сравнивать их с существующими варочными

котлами, позволяет снизить время разогрева варочного объема путем снижения потерь тепла в окружающую среду. Пар вводится в рубашечное пространство котлов с прямым обогревом посредством особого штуцера, расположенного около дна тепловой рубашки.

Конденсат, который возник на стенках варочного сосуда под действием силы тяжести, стекает ко дну рубашечного пространства, от которого затем удаляется. Когда штуцер, вводящий пара в рубашечной пространство, располагается в нижней её части, дополнительного штуцера для удаления конденсата обычно не требуется. В этом случае конденсат из рубашки удаляется через штуцер ввода пара в пространство тепловой рубашки.

Так же, тепловая рубашка котла и его варочная емкость могут иметь и другие штуцеры, предназначенные для подвода и отвода продукта в сосуд и установки контрольно-измерительных приборов.

В варочных котлах мясоконсервной промышленности вывод продукта часто осуществляется опрокидыванием варочного сосуда, путем поворота на специальных опорах.

Тепловая рубашка и пищеварочная емкость могут быть соединены между собой как разъемным, так и неразъемным соединением. Например, на сегодняшний день разработан и защищен патентом котел, конструкция которого позволяет отсоединить пищеварочную емкость с приготовленным в ней пищевым продуктом от генератора пара и подготовить к раздаче без перемещения и дополнительного нагрева продукта, что значительно уменьшает трудовые затраты на производстве.

Неотъемлемой конструктивной частью любого теплового рубашечного аппарат является крышка. Ее основная функция - снизить тепловые потери от пищевого продукта в окружающую среду. Если пищеварочный сосуд допустимо закрыть негерметично, обычно применяются плоские крышки. Основное их достоинство - простота изготовления, но такие крышки имеют малую прочность нагруженной плоской стенки, а значит, требуют повышенной металлоемкости.

Для уменьшения тепловых потерь, в рубашечных аппаратах применяются двухслойные крышки. При их использовании, снижение теплотерь достигается большим термическим сопротивлением переносу тепла прослойкой воздуха, находящейся между стенками крышки. Для пищеварочных емкостей рубашечных аппаратов, применяемых на пищевых производствах, обычно применяют сферические или эллиптические крышки [136].

Как указывалось выше, в рубашечных тепловых аппаратах предусмотрена установка парогенератора.

В рубашечных варочных аппаратах парогенератор представляет собой емкость, предназначенную для кипячения рабочей жидкости. Образующийся в процессе нагрева жидкости пар используется для передачи энергии нагреваемому продукту. Наиболее распространенной рабочей жидкостью является вода. Реже используют органические жидкости, такие как этиленгликоль или глицерин, а также высокотемпературные теплоносители дикумилметан и дитолилметан [98]. Обычно, парогенератор выполняют либо в виде отдельного приварного или съемного узла, либо проектируют парогенератор у дна тепловой рубашки, нагреватели парогенератора при этом располагают непосредственно на дне рубашки.

Существуют также рубашечные аппараты с парогенераторами, основанными на циркуляции, в таких парогенераторах часть энергии пара используется для образования движения жидкости по контуру, который образован парогенератором и трубами (подъемной и опускной) [45].

К достоинствам аппаратов с такими парогенераторами можно отнести продольное движение воды по поверхностям нагревательных элементов.

При таких условиях, в процессе кипения воды, не происходит образования крупных паровых пузырей на поверхностях нагревательных элементов, так же не происходит повышения содержания солей в рабочей жидкости. Это снижает интенсивность коррозии внутренних стенок рубашки и варочного сосуда, что ведет к уменьшению количества солевых отложений на стенках и нагревателях.

В качестве тепловыделяющих элементов в парогенераторах, работающих от электрического тока применяются как электронагреватели на основе карбида кремния – силитовые (СЭНы), так и трубчатые электронагреватели (ТЭНы) [45].

В зависимости от вида энергии, применяющейся в парогенераторах, они также же подразделяются на паровые, газовые и работающие на твердом топливе. Конструкции парогенераторов, работающих не на электрической энергии и аппараты, на которых такие парогенераторы используются, широко представлены в литературе [41, 58, 121].

1.3 Тепловые процессы, протекающие в рубашечных пищевых аппаратах

Характер тепловых процессов, протекающих в пищеварочных котлах предприятий общественного питания, чрезвычайно разнообразен. В пищеварочных котлах с косвенным обогревом, выпускаемых сегодня промышленностью, происходят такие типы теплопереноса, как: конденсация, свободная конвекция, кипение, массоперенос, вынужденная конвекция, лучистый теплоперенос, внутреннее накопление тепла за счет теплоемкости сред и теплопроводность.

После того, как рабочая жидкость закипит в парогенераторе, в рубашечном пространстве котла генерируется пар. Кипение происходит на поверхностях электронагревателей, которые размещены в парогенераторе.

Процесс теплопереноса от пара к пищеварочному сосуду в аппаратах с косвенным обогревом разделяют на три этапа: процесс тепло- и массообмена, протекающих совместно между основным объемом пара в рубашечном пространстве и поверхностью пленки конденсата на стенке технологической емкости пищеварочного сосуда, а также теплообмен между внутренней стенкой сосуда и основной массой пищевого продукта, проходящей в условиях или свободно-конвективного движения, или кипения. Причиной появления таких различных форм передвижения сред в аппарате являются следующие факторы.

Температура пара, поступающего в рубашку, выше чем температура поверхности конденсатной пленки, поэтому разность давлений пара, а значит и разность содержания пара в парогазовой смеси с компонентами, которые не конденсируются, будет вызывать диффузионный массоперенос, который направлен по нормали к поверхности конденсатной пленки. Поскольку во внутреннем объеме рубашки котла давление является постоянным, то уменьшение давления пара в процессе приближения к конденсационной поверхности будет означать пропорциональное увеличение парциального давления, а из-за этого и концентрации компонента, который не конденсируется. В случае, когда указанный выше компонент оказывается тяжелее пара, плотность смеси у поверхности конденсации будет выше плотности смеси на удалении от конденсатной пленки. Это обстоятельство ведет к возникновению сил Архимеда. Из-за этих сил, вблизи стенок возникает свободная конвекция, а значит процесс свободно-конвективного массопереноса вещества пара. Это передвижение имеет место в случаи наличия разности температур пара и поверхности конденсации [47].

В результате теплообмена между внутренней поверхностью пищеварочного сосуда и массой пищевого продукта, возникает свободно-конвективный массообмен.

Тепловые потери аппарата возникают в процессе переноса тепла теплопроводностью через стенки рубашки и крышку варочной емкости в окружающую среду.

Отвод теплоты в окружающую среду, который происходит в зоне боковых поверхностей пищеварочного аппарата, а также от его крышки, осуществляется как за счет лучеиспускания, так и свободной конвекцией.

Как следует из указанного выше, тепловом аппарате с косвенным обогревом процессы протекают как совместно, так и отдельно. Итоговая интенсивность этих процессов зависит от всех режимных параметров, а также геометрических размеров, определяющих интенсивность каждого вида тепло- или массообмена в

отдельности. Следовательно, при разработке аппаратов с косвенным обогревом необходимо учитывать это обстоятельство, а также то, что такие аппараты работают в нестационарном режиме работы.

1.4 Двухфазные теплоносители, применяемые на сегодняшний день в пищеварочных котлах.

На сегодняшний день, основным видом теплоносителя, применяющимся в рубашках пищеварочных котлов, является водяной пар. Насыщенный водяной пар давлением до 10^5 Па широко применяют для нагревания до 120-130° С; применение же пара более высокого давления усложняет и удорожает процесс и экономически не оправдывается.

По сравнению с другими теплоносителями пар имеет следующие преимущества:

- высокий коэффициент теплоотдачи;
- небольшой расход, благодаря высокой удельной теплоте конденсации;
- легкое транспортирование по трубопроводам и простое регулирование необходимой степени нагрева;
- равномерность нагрева продукта, так как конденсация пара происходит при постоянной температуре;
- высокий КПД тепловых установок при использовании теплоты парового конденсата.

Пар также удовлетворяет другим требованиям, которые предъявляются к теплоносителям.

К главным недостаткам водяного пара можно отнести возрастание давления в рубашечном пространстве при увеличении температуры. По этой причине температуры разогрева насыщенным водяным паром, в промышленности обычно не поднимают выше 180-190 °С, что соответствует давлению пара 10 - 12 бар. При давлениях, превышающих 12 бар, необходима толстостенная аппаратура высокой

стоимости, а также велики расходы на коммуникации и арматуру. В тепловом кулинарном оборудовании влажный насыщенный пар используется при избыточных давлениях до 50 кПа. Это определяется большими объемами паровых теплообменников, их чувствительностью к линейным деформациям и повышенной опасностью; как известно, сосуды объемом более 25 дм³ с избыточным давлением более 70 кПа подведомственны контролю органами Госнадзора РФ.

Высокотемпературные органические теплоносители (дитолилметан, дикумилметан, дифенильная смесь), использующиеся в жарочных аппаратах, эффективно и устойчиво работают в двухфазном состоянии, так как представляют собой изоляторы с практически постоянными физическими константами. Они имеют высокие температуры кипения и сравнительно низкие температуры затвердевания, термостойки при температурах до 300 °С и не оказывают коррозионного воздействия на металлы. Однако для обеспечения рабочих температур порядка 200...240 °С эти теплоносители должны работать при вакууме, а теплообменники быть абсолютно герметичными.

Все приведенные выше теплоносители обладают одним явно выраженным недостатком – все они могут работать только при давлении в рубашке выше атмосферного. Нагнетание и удержание в рубашке повышенного давления влечет за собой большие затраты материалов для обеспечения необходимой прочности рубашки. Увеличение толщины стенок рубашки, в свою очередь, ведет к увеличению тепловой инерции, а значит и к излишним затратам энергии на нагрев рубашки, а не пищевой среды. Так же необходимо усложнение конструкции аппарата – добавление в конструкцию контрольно–измерительных приборов давления в рубашке, предохранительных клапанов и других дополнительных устройств. Эти факторы ведут к увеличению стоимости проектирования и производства пищеварочных котлов рубашечного типа, а также усложнению их обслуживания, повышенному риску работающего с ними персонала.

Все вышеприведенные факторы ведут к серьезным экономическим потерям. Для того, чтобы снизить металлоемкость, тепловую инерцию упростить конструкцию и условия эксплуатации пищеварочных котлов с косвенным обогревом, логично принять меры для снижения давления в рубашке пищеварочного котла до атмосферного. При атмосферном давлении конструкция и условия эксплуатации пищеварочного котла будут упрощены настолько, насколько это вообще возможно на существующем уровне технологии. Наиболее простым способом снизить давление в рубашке пищеварочного котла является применение в рубашке такого двухфазного теплоносителя, который был бы способен работать при атмосферном давлении и обеспечивать при это необходимую температуру нагрева пищевой среды, то есть иметь температуру кипения порядка 105..110 °С. Одновременно теплоноситель должен отвечать всем требованиям, предъявляемым к двухфазным теплоносителям, применяемым в рубашках пищеварочных аппаратов с косвенным обогревом.

Подобрать двухфазные теплоносители, имеющие температуру кипения при атмосферном давлении порядка 105..110°С, обеспечивающие эффективный температурный напор и мягкий косвенный обогрев стенок рабочих камер варочных технологических аппаратов, - не простая задача. Но решив эту задачу можно значительно уменьшить толщину стенок паровых теплообменников и, как следствие, их материалоемкость и тепловую инерцию, сократить расход энергии и значительно упростить условия эксплуатации.

Одним из перспективных направлений является использование водных растворов солей и щелочей. Как известно, водные растворы, благодаря температурной депрессии, могут изменять температуру кипения при атмосферном давлении при изменении концентрации растворенных солей.

Температурной депрессией называется разность температуры кипения чистого растворителя и раствора при одинаковом давлении. Ее значение зависит как от концентрации раствора, так и от природы растворителя и растворенного

вещества. Давление тоже оказывает влияние на степень температурной депрессии.

Также перспективным является применение водных растворов других веществ, таких как глицерин и пропиленгликоль.

Использование данных растворов, вместо применяемых на сегодняшний день двухфазных теплоносителей, работающих на избыточном давлении, позволит значительно упростить конструкцию и снизить металлоемкость аппаратов.

Однако, при применении водных растворов солей и щелочей в качестве двухфазных теплоносителей, работающих в рубашках пищеварочных котлов, может возникнуть ряд факторов, препятствующих их нормальной работе. В первую очередь это отложение осадков солей и щелочей на нагревательных элементах и стенках котлов в качестве накипи. Так же, вследствие выпадения осадка из растворов солей и щелочей при нагревании, концентрация этих растворов в рубашке пищеварочного котла может меняться со временем, что повлечет за собой изменение теплофизических свойств данных растворов. Есть опасность коррозии нагревательных элементов вследствие их контакта с солевыми и щелочными растворами. Следовательно, эти растворы перестанут отвечать требованиям, предъявляемым к двухфазным теплоносителям, работающим в рубашках пищеварочных аппаратов с косвенным обогревом.

Для проверки изложенных выше предположений необходимо сконструировать экспериментальную установку и провести эксперимент, целью которого будет проверка растворов солей и щелочей в условиях, приближенных к работе в рубашке пищеварочных аппаратов с косвенным обогревом.

1.5 Постановка цели и задач исследования.

Исходя из вышеизложенного, 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, исключая их перегрев в холостых зонах. В связи с поставленной целью решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. Анализ существующих промежуточных теплоносителей, применяемых в рубашечных пищеварочных аппаратах и системах жидкостного отопления и их сравнение.
2. Аналитическое исследование теплофизических характеристик перспективных двухфазных теплоносителей на основе водных растворов.
3. Экспериментальное исследование теплотехнических свойств перспективных двухфазных теплоносителей и установление функциональных зависимостей теплотехнических параметров от вида теплоносителя и режима работы.
4. Обоснование выбора оптимального двухфазного теплоносителя, способного работать в рубашках пищеварочных аппаратов при атмосферном давлении.
5. Исследование возможности обеспечения двузонного изотермического нагрева стенок рабочей камеры аппаратов с косвенным обогревом на основе температурной депрессии водных растворов пропиленгликоля, с целью повышения качества приготовляемой кулинарной продукции.

6. Подтверждение работоспособности и эффективности кулинарной обработки продукта при использовании выбранного теплоносителя по результатам технологических испытаний пищеварочного котла.

7. Определение методов расчета поверхности теплообмена при использовании водных растворов пропиленгликоля.

Согласно поставленным выше целям и задачам, в следующих главах приводятся результаты экспериментальных и аналитических исследований по выбранной теме.

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ.

2.1 Расчет теплотехнических характеристик перспективных промежуточных теплоносителей

В соответствии с задачами, поставленными в главе 1, возникает необходимость аналитического расчета теплотехнических характеристик веществ, которые можно использовать в качестве универсальных двухфазных теплоносителей в рубашечных аппаратах общественного питания.

Для описания теплообмена и расчета теплообменных процессов и аппаратов, необходимо знать теплофизические характеристики применяемых растворов.

При конденсации, как и во всех других процессах теплоотдачи, используют уравнение теплоотдачи. Согласно уравнению конвективной теплоотдачи, называемому также законом Ньютона, тепловой поток прямо пропорционален разности температур жидкости и стенки и площади поверхности теплообмена:

$$Q = \alpha \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}}) \cdot F, \quad (1)$$

$$Q = \alpha \cdot \Delta t_{\alpha} \cdot F, \quad (2)$$

$$q = \alpha \cdot \Delta t_{\alpha}, \quad (3)$$

Где: Q - тепловой поток, Вт;

$q = Q / F$ - поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²;

α - коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\Delta t_\alpha = t_H - t_C$ - температурный напор теплоотдачи, °С;

F - площадь поверхности теплообмена (стенки), м² ;

t_C - температура поверхности теплообмена (стенки), °С;

$t_H = t_{ж}$ - температура жидкости вдали от стенки (полагаем, что она постоянна вдоль всей поверхности теплообмена и равна температуре насыщения конденсирующейся жидкости при заданном давлении), °С.

Коэффициент α , являющийся коэффициентом пропорциональности, в данном уравнении называют коэффициентом конвективной теплоотдачи. Его величина находится в зависимости от большого числа различных факторов: скорости движения жидкости; величины температурного напора; физических свойств жидкости; формы, размеров и ориентации в пространстве поверхности теплообмена и т.п.

Средний коэффициент теплоотдачи от пара к стенке вычисляют по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F(t_H - t_C)}, \text{ Вт/(м}^2 \text{ град)} \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет путем эксперимента найти средний коэффициент теплоотдачи с помощью измерения величин Q , F , t_C и t_H .

В процессе пленочной конденсации интенсивность теплоотдачи зависит от вида режима течения конденсатной пленки, который определяется значением числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V \cdot R_0}{\nu} \quad (5)$$

Где: V - средняя скорость течения пленки в данном сечении, м/с; $R_0 = \delta$ - толщина конденсатной пленки, м; ν - кинематический коэффициент вязкости пленки, м²/с.

В процессе течения конденсатной пленки выделяют три режима: волновой, ламинарный и смешанный. Экспериментально установлено критическое число Рейнольдса $Re_{кр}$. При $Re < Re_{кр}$ имеет место ламинарный режим течения. При $Re > Re_{кр}$ - смешанный режим течения в расчетах используются безразмерные величины (критерии подобия) и физические комплексы.

$$Z = l_0 \cdot \Delta t \cdot A(t_H) - \text{приведенная высота};$$

$$Re = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \cdot D(t_H) - \text{число Рейнольдса};$$

$$A(t_H) = \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda}{r \cdot \mu} B(t_H) = \frac{4}{r \cdot \mu} - \text{комплексы, зависящие от } t_H;$$

$$\varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_c} \right) \right]^{\frac{1}{8}} - \text{поправка, учитывающая зависимость конденсата от}$$

температуры,

Где α - искомый коэффициент теплоотдачи; l_0 - характерный размер; $\Delta t = t_H - t_c$ - температурный напор; t_H - температура насыщения; t_c - температура стенки; μ, λ, ν - свойства конденсата, выбранные при температуре t_H ; μ_c, λ_c - свойства конденсата, выбранные при температуре t_c ; g - ускорение силы тяжести; r - удельная теплота фазового перехода.

В ламинарной области для расчета коэффициента конденсации неподвижного пара, характерного для тупиковых теплообменников рубашечного типа, в первом приближении может быть использована формула Нуссельта. Для вертикальных труб:

$$\alpha = 0,943 \cdot \left[r \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3 / (\mu \cdot \Delta t \cdot h) \right]^{1/4} \quad (6)$$

Таким образом, необходимо иметь значения плотности (ρ), вязкости (μ), теплопроводности (λ) и теплоты парообразования (r) водных растворов, рекомендуемых в качестве универсального теплоносителя.

С целью подобрать оптимальный теплоноситель, были проведены аналитические расчеты теплотехнических характеристик ряда водных растворов солей, щелочей, глицерина, а также этиленгликоля и пропиленгликоля.

Для расчета данных теплофизических характеристик водных растворов, предлагаемых в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей, применялись номограммы, приведенные в номографическом справочнике под редакцией П.Е. Богданова [14].

Теплоемкость, теплопроводность, плотность и вязкость водных растворов солей и щелочей определялась по номограмме на рисунках 2.1а, 2.1б, 2.1в и 2.1д соответственно.

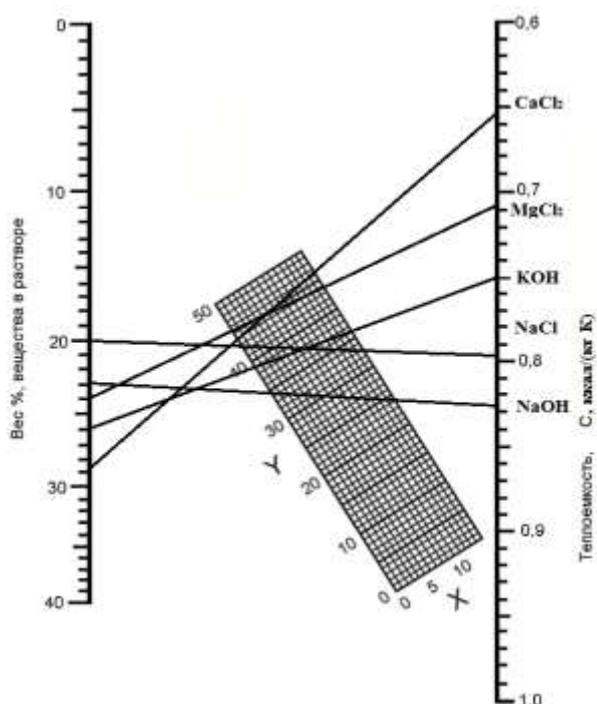
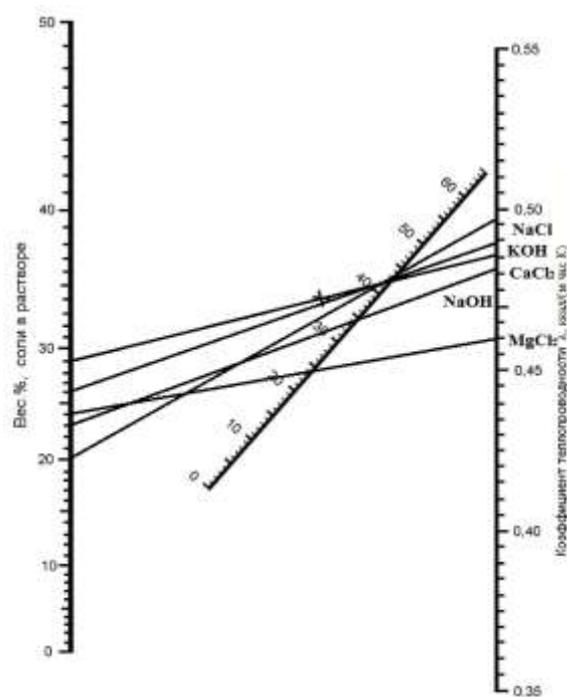
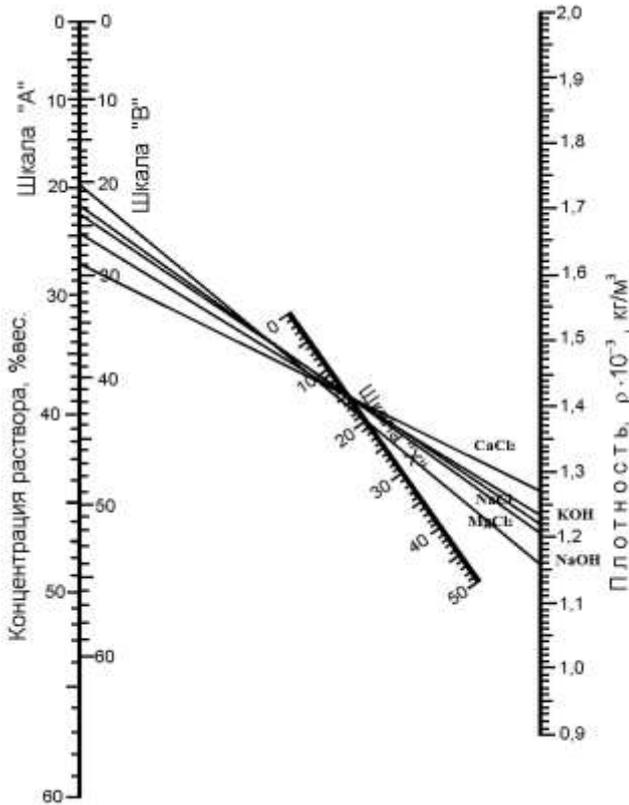


Рисунок 2.1 - а).
Номограмма для определения
теплоемкости водных растворов
растворов солей и щелочей

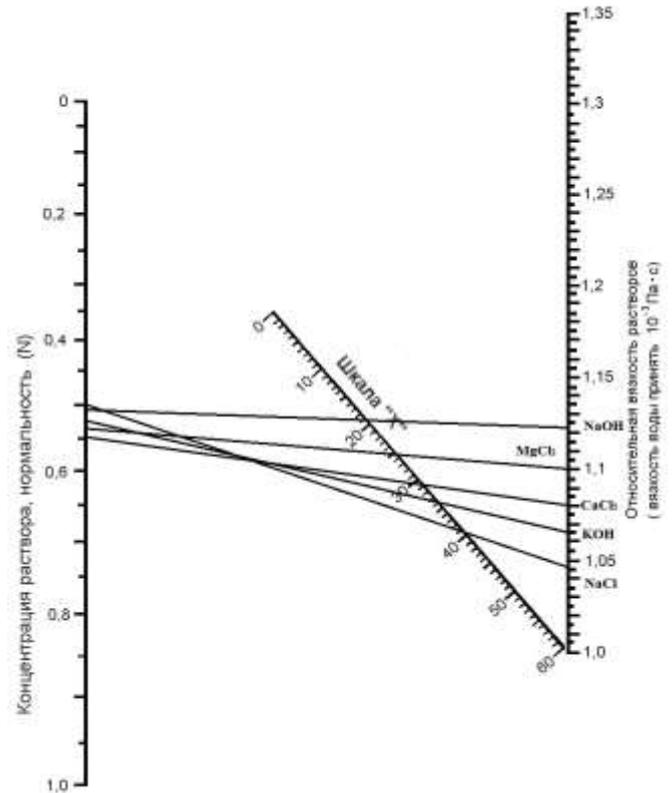


б).
Номограмма для расчета
теплопроводности водных
растворов солей и щелочей



в).

Номограмма для определения плотности водных растворов солей и щелочей



г).

Номограмма для определения вязкости водных растворов солей и щелочей

Ниже определены аналитически, используя известные методы, значения теплоты испарения, плотности, теплоемкости, теплопроводности и кинематической вязкости растворов в пределах температур кипения жидкостей.

Для вычисления теплоты испарения водных растворов использовано уравнение Клапейрона — Клаузиуса .[119]

$$r = l/m \quad (7),$$

где: r - теплота испарения жидкости, кДж/кг; m -молекулярный вес, а.е.м.;
 l - молекулярная теплота испарения, кДж/кг•моль.

В технических единицах измерения эта формула представляется так:

$$r = \left(\frac{4,13 \ln T - 0,007T}{m} \right) T \quad (8),$$

T - температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;

m - молекулярный вес, а. е. м.

Расчетные значения теплоты испарения водных растворов солей и щелочей при атмосферном давлении приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Теплота испарения растворов некоторых веществ

Раствор вещества	$T_{\text{кипения}},$ °С	$m_{\text{вещества}},$ а.е.м	Концентрация (г/100г воды)	Теплота испарения, кДж/кг
NaCl	105	58	25,5	1324,7
MgCl ₂	110	94	32,3	688,94
NaOH	110	40	30,0	1631,05
KOH	110	56	34,5	1261,4
CaCl ₂	110	110	41,5	927,64
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	92	176,64	681,35
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	62	112,8	906
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	76	143,9	809

Также была рассчитана плотность предложенных водных растворов тех же веществ [119].

Плотность растворов $\rho(t)$ может быть вычислена по формуле:

$$\lg(\rho(t)) = \lg(\rho_{\text{H}_2\text{O}}(t)) + (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2) \cdot x \quad (9),$$

где x - концентрация растворенного вещества, кг соли/кг раствора;

t - температура, °С; a_0, a_1, a_2 - коэффициенты, приведенные в таблице 2.2;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}(t)$ - плотность воды при заданной температуре, кг/м³

Таблица 2.2 – Коэффициенты, применяемые для расчета плотности некоторых веществ

Растворенное вещество	$a_0 \cdot 10^4$	$a_1 \cdot 10^6$	$-a_2 \cdot 10^8$
NaCl	2889,19	614,36	447,68
MgCl ₂	3372,00	791,13	324,26
NaOH	3937,43	370,31	271,64
KOH	3589,98	406,64	271,68
CaCl ₂	3518,10	463,51	270,30

Расчетные значения плотности предложенных водных растворов веществ при атмосферном давлении представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Плотность растворов некоторых веществ

Раствор вещества	$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	Концентрация (г/100г воды)	Плотность раствора, г/см ³
NaCl	105	25,5	1,132
MgCl ₂	110	32,3	1,230
NaOH	110	30,0	1,250
KOH	110	34,5	1,245
CaCl ₂	110	41,5	1,282
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	176,64	1,160
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	112,8	1,032
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	143,9	0,985

Для приближенного расчета средней удельной теплоемкости водных растворов веществ в диапазоне от 0 до 110 °С была применена формула, основанную на принципе аддитивности этой функции:

$$c_0 = (m_1c_1 + m_2c_2)/(m_1 + m_2), \quad (10)$$

где c_1 и c_2 – удельные теплоемкости воды и вещества Дж/кг•К;

m_1 и m_2 – массы воды и вещества, кг

Расчетные значения средней удельной теплоемкости растворов предложенных веществ при атмосферном давлении приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Теплоемкость растворов некоторых веществ

Раствор вещества	T _{кипения} , °C	Концентрация (г/100г воды)	Теплоемкость, Дж/(г·град)
NaCl	105	25,5	3,52
MgCl ₂	110	32,3	3,36
NaOH	110	30,0	3,80
KOH	110	34,5	3,60
CaCl ₂	110	41,5	3,09
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	176,64	3,35
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	112,8	3,56
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	143,9	3,83

Теплопроводность водных растворов веществ рассчитана по методике [119].

Теплопроводность $\lambda(t)$ водных растворов была вычислена по формуле:

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{H}_2\text{O}}(t) \cdot (1 - B \cdot x) \quad (11),$$

где λ - теплопроводность раствора, Вт/(м·К); x – концентрация растворенного вещества, кг вещества/кг раствора; t - температура, °C;

B – коэффициент, приведенный в таблице 2.5; $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}(t)$ - теплопроводность воды, Вт/(м·К).

Таблица 2.5 - Коэффициенты, применяемые для расчета теплопроводности некоторых веществ

Растворенное вещество	$B \cdot 10^3$
NaCl	156,97
MgCl ₂	493,17
NaOH	-128,84
KOH	130,74
CaCl ₂	69,74

Расчетные значения теплопроводности предложенных водных растворов при атмосферном давлении приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Теплопроводность растворов некоторых веществ

Раствор вещества	$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	Концентрация (г/100г воды)	Теплопроводность, Вт/(м*К)
NaCl	105	25,5	0,618
MgCl ₂	110	32,3	0,604
NaOH	110	30,0	0,705
KOH	110	34,5	0,662
CaCl ₂	110	41,5	0,671
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	176,64	0,365
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	112,8	0,385
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	143,9	0,331

Кинематическая вязкость $\nu(t)$ водных растворов веществ может быть рассчитана по формуле [42]:

$$\nu(t) = \mu/\rho, \quad (12)$$

где: ρ - плотность раствора, кг/м³; μ - коэффициент динамической вязкости раствора, Па•с, который может быть вычислен по формуле:

$$\lg(\mu(t)) = \lg(\mu_{\text{H}_2\text{O}}(t)) + (d_0 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2) \cdot x, \quad (13)$$

где:

x – концентрация растворенного вещества, кг соли/кг раствора,

t - температура, °C

d_0, d_1, d_2 - коэффициенты, приведенные в таблице 2.7

$\mu_{\text{H}_2\text{O}}(t)$ - вязкость воды при заданной температуре, Па•с

$\mu_{\text{H}_2\text{O}}(t)$ может быть рассчитана по следующей формуле: $\mu_{\text{H}_2\text{O}}(t) = 0,59849 \cdot (43,252 + t)^{-1,5423}$

Таблица 2.7 - Коэффициенты, применяемые для расчета кинематической вязкости некоторых веществ

Растворенное вещество	$d_0 \cdot 10^2$	$d_1 \cdot 10^4$	$d_2 \cdot 10^9$
NaCl	89,22	17,96	-45,46
MgCl ₂	217,86	-38,25	4170,79
NaOH	347,89	-122,35	544,64
KOH	118,70	17,06	-1098,35
CaCl ₂	148,28	-13,30	-3648,23

Расчетные значения кинематической вязкости предложенных водных растворов солей и щелочей при атмосферном давлении приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Кинематическая вязкость растворов некоторых веществ

Раствор вещества	$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	Концентрация (г/100г воды)	Кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$
NaCl	105	25,5	0,527
MgCl ₂	110	32,3	0,585
NaOH	110	30,0	0,680
КОН	110	34,5	0,506
CaCl ₂	110	41,5	0,507
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	176,64	0,760
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	112,8	0,710
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	143,9	0,980

Рассчитанные выше теплотехнические характеристики предложенных водных растворов представлены в сводной таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Сводная таблица теплотехнических характеристик некоторых веществ

Раствор вещества	$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	Концентрация (г/100г воды)	Теплота испарения, кДж/кг	Плотность раствора, г/см ³	Теплоемкость, Дж/(г·град)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$
NaCl	105	25,5	1324,7	1,132	3,52	0,618	0,527
MgCl ₂	110	32,3	688,94	1,230	3,36	0,604	0,585
NaOH	110	30,0	1631,05	1,250	3,80	0,705	0,680
КОН	110	34,5	1261,4	1,245	3,60	0,662	0,506
CaCl ₂	110	41,5	927,64	1,282	3,09	0,671	0,507
C ₃ H ₅ (OH) ₃	110	176,64	681,35	1,160	3,35	0,365	0,760
C ₂ H ₄ (OH) ₂	110	112,8	906	1,032	3,56	0,385	0,710
C ₃ H ₆ (OH) ₂	110	143,9	806	0,985	3,83	0,331	0,980

Как видно из таблицы 2.9, наибольшей теплоемкостью, теплопроводностью и теплотой испарения среди представленных водных растворов веществ обладает

раствор NaOH, так же у этого раствора наименьшая концентрация, необходимая для достижения требуемой температуры кипения. Наименьшей плотностью обладает водный раствор пропиленгликоля, наименьшей кинематической вязкостью – водный раствор KOH. Глицерин требует наибольшей концентрации в растворе для обеспечения необходимой температуры кипения. Водный раствор NaCl не может обеспечить необходимой температуры кипения из-за достижения точки насыщения.

2.2 Выбор исследуемого перспективного теплоносителя

Перед началом испытаний вышеуказанных теплоносителей на экспериментальном стенде, был проведен их опытный разогрев до температуры кипения. Это имело целью выяснить, насколько стабильны данные теплоносители при своей рабочей температуре, не произойдет ли расслоения жидкости или выпадения осадка. Разогрев производился в прозрачной посуде на электрической конфорке, температура замерялась спиртовым термометром с шкалой 150°C и ценой деления 1°C.

Разогрев этиленгликоля не производился, т.к. этиленгликоль ядовит и при нагревании до температуры кипения выделяет токсичные пары. Это является неприемлемым с точки зрения безопасности труда на предприятиях общественного питания, так как есть риск вдыхания паров персоналом, обслуживающим пищеварочные котлы, поскольку рубашки пищеварочных котлов сообщаются с атмосферой и не являются герметичными. Так же есть риск попадания этиленгликоля в пищу, что сделает ее ядовитой. Это также неприменимо, а следовательно, этиленгликоль не может быть применен в качестве двухфазного промежуточных теплоносителя, использующегося для косвенного обогрева в тепловых технологических аппаратах предприятий общественного питания и может быть использован лишь в герметичных теплообменниках. Поскольку рубашка котла, использованного в

экспериментальном стенде, так же сообщается с атмосферой, испытания этиленгликоля не производились.

Нагревание водных растворов оставшихся веществ до температуры кипения показало, что при нагревании солевых и щелочных растворов до их температуры кипения, в резервуаре образуется недопустимо большое количество накипи, что ведет к быстрому уменьшению концентрации соли или щелочи в растворе. Так же накипь вызывает уменьшение теплопроводности, стенок теплообменников, на которых она выпадает, и приводит к их коррозии. По результатам экспериментального исследования, были сделан вывод о нецелесообразности использования водных растворов солей и щелочей в качестве двухфазных промежуточных теплоносителей, используемых для косвенного обогрева стенок рабочих камер тепловых технологических аппаратов предприятий общественного питания.

Водный раствор глицерина требует слишком большой концентрации вещества для обеспечения необходимой температуры кипения, что не выгодно с экономической точки зрения.

Исходя из вышеизложенного, оптимальным веществом рассмотренном в исследовании, водный раствор которого может быть использован в качестве промежуточного двухфазного теплоносителя в рубашечных аппаратах пищевых производств, является пропиленгликоль. Он по химической структуре и теплофизическим характеристикам близок к этиленгликолю, однако не ядовит и полностью безопасен для человека и окружающей среды, что подтверждают паспорт безопасности за номером 30193885/SDS_GEN_RU/RU от 19.01.2006 и санитарно-эпидемиологическое заключение за номером 77.99.02.916.Д.004723.06.04 от 07.06.2004. Пропиленгликоль хорошо растворяется в воде, его водные растворы так же отвечают требованиям, предъявляемым к двухфазным промежуточным теплоносителям.

Как видно из таблицы 2.9, температура кипения представленного в ней раствора пропиленгликоля составляет 110°C , что позволяет использовать его в

качестве двухфазного промежуточного теплоносителя, используемого для косвенного обогрева стенок рабочих камер в варочных аппаратах предприятий общественного питания. Так же эта температура кипения позволяет использовать раствор пропиленгликоля в системах обогрева передвижных предприятий питания. Температура кипения чистого пропиленгликоля составляет 189°С, что позволяет использовать его в высокотемпературном жарочном оборудовании предприятий общественного питания. Температуры кристаллизации чистого пропиленгликоля и его водного раствора достаточно низки для применения на передвижных предприятиях общественного питания в любой климатической зоне РФ без технических трудностей.

Так же о возможности использования водного раствора пропиленгликоля в качестве теплоносителя для систем отопления предприятий общественного питания позволяет судить то, что промышленность на сегодняшний день выпускает широкий спектр теплоносителей, в основе которых лежит водный раствор пропиленгликоля. Эти теплоносители используются как в быту, так и на предприятиях в отопительных системах, в качестве автомобильных антифризов, антиобледенителей. В таблице 2.10 приведены сравнительные теплотехнические характеристики, а также приблизительная цена на момент написания статьи трех самых распространенных отечественных теплоносителей на основе водного раствора пропиленгликоля.

Как видно из таблицы 2.10, выпускаемые промышленностью теплоносители на основе водного раствора пропиленгликоля имеют сравнительно схожие с 55% водным раствором пропиленгликоля теплотехнические характеристики, однако они содержат дополнительные присадки, снижающие коррозию, пенообразование, растворение, образование отложений. Эти присадки являются коммерческой тайной. При необходимости, возможно использование одного из этих теплоносителей, как в системе отопления, так и в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей в рубашках пищеварочных котлов и других

тепловых технологических аппаратов общественного питания с косвенным обогревом.

К достоинствам теплоносителя на основе водного раствора пропиленгликоля можно так же отнести способность менять температуру кипения в зависимости от концентрации.

Таблица 2.10 - Основные теплотехнические характеристики и цены некоторых теплоносителей, выпускаемых промышленностью

Теплоноситель	Температура кипения, °С	Температура кристаллизации, С	Концентрация пропиленгликоля	Плотность раствора, г/см ³	Удельная теплоемкость кДж/(кг·град)	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	Кинематическая вязкость, ×10 ⁻⁶ м ² /с	Цена за кг, руб.
ХНТ-40	106	-40	0,46	1,06	3,5	0,35	1,3	78..89
Хот Блад – 65Эко	110	-50	0,50	1,048	3,62	0,78	1,1	78..92
Dixis Top	106	-40	0,451	1,045	4,128	0,59	1,2	65..72

На рисунке 2.2 представлен график зависимости температуры кипения водного раствора пропиленгликоля в зависимости от концентрации пропиленгликоля. На графике отмечена зона 102..110 °С, показывающая возможность использования водных растворов пропиленгликоля в качестве двухфазных промежуточных теплоносителей, используемых для косвенного обогрева стенок рабочих камер в варочных аппаратах предприятий общественного питания. Температура кипения чистого пропиленгликоля составляющая 189 °С, так же отмечена на графике. Высокая температура кипения позволяет использовать чистый пропиленгликоль в высокотемпературном жарочном оборудовании предприятий общественного питания.

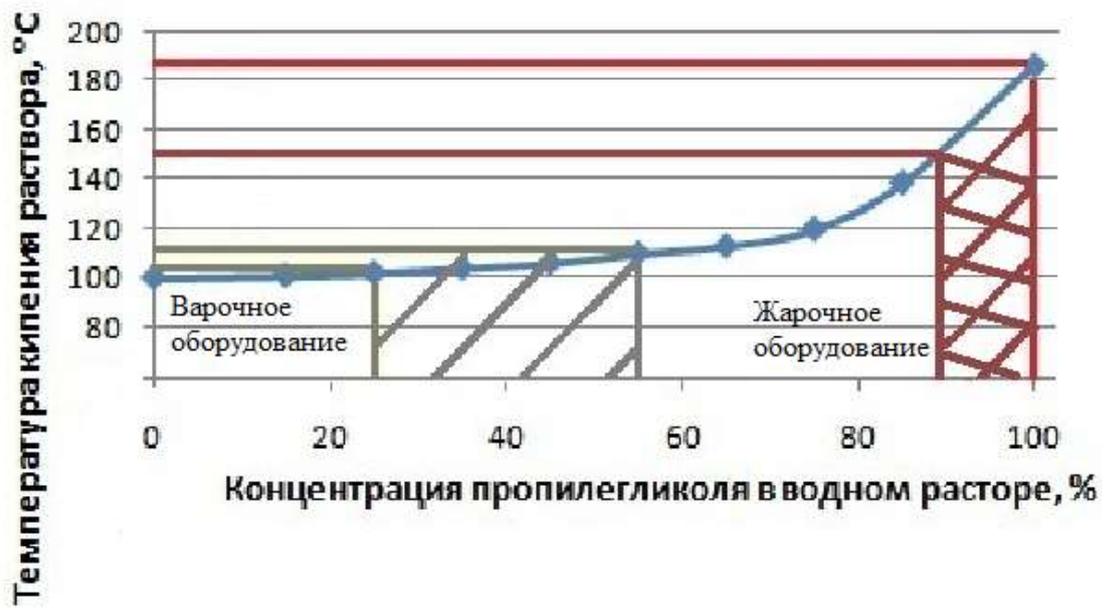


Рисунок 2.2 - Зависимость температуры кипения водного раствора пропиленгликоля от концентрации

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

С целью экспериментального подтверждения способности водного раствора пропиленгликоля работать в качестве двухфазного теплоносителя в рубашечных аппаратах предприятий общественного питания, был смонтирован экспериментальный стенд на основе рубашечного пищеварочного котла Groen TDB/6-10. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.1.

3.1 Экспериментальный стенд

Для проверки работоспособности предложенных перспективных теплоносителей, а также для сбора данных о ходе теплообменных процессов в рубашке котла и пищеварочном сосуде, на основе которых можно рассчитать коэффициенты теплопередачи, был собран экспериментальный стенд на основе настольного пищеварочного котла фирмы Groen(США), модели TDB/6-10. На данной установке проводились как исследования стандартного теплоносителя – воды, так и перспективных – чистого пропиленгликоля и его водных растворов.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.1.

Основой экспериментальной установки является электрический пищеварочный котел рубашечного типа фирмы Groen(1), модель TDB/6-10, вместимостью 0,01 м³. Емкость рубашки составляет 0,0035 м³, площадь рубашки 0,55 м². Мощность нагревательного элемента (ТЭНа)(5) котла составляет 4 кВт. Котел оснащен предохранительным клапаном(12), через канал которого так же осуществляется заливка рубашки(2) и манометром(13), измеряющим давление в пароводяной рубашке со шкалой измерения от -0,5 до 5 бар и ценой деления 0,1 бар. Котел сделан из нержавеющей стали, дополнительной теплоизоляции не предусмотрено. Перед началом эксперимента пустой котел был взвешен на

весах(11), полная масса пустого котла (варочной емкости, основания и блока управления) равна 45,3 кг.

Котел подключен к сети переменного тока напряжением 220В через контрольно-измерительный прибор К505(7), измеряющий силу тока, напряжение и мощность. На внутреннюю поверхность пищеварочного сосуда, а так же на внешнюю стенку котла наварены хромель-капелевые термопары с диаметром термоэлектрода 0,5 мм(4), термопары на внешней стенке теплоизолированы. Так же одна термопара находится на кронштейне в центре варочного сосуда. Все термопары подключены к контрольному потенциометру-самописцу КСП-4(6), со шкалой измерения 0..150°C и ценой деления 1°C.

Для определения начальных условий эксперимента используется термометр спиртовой(10) со шкалой -40..+40°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 секунды.

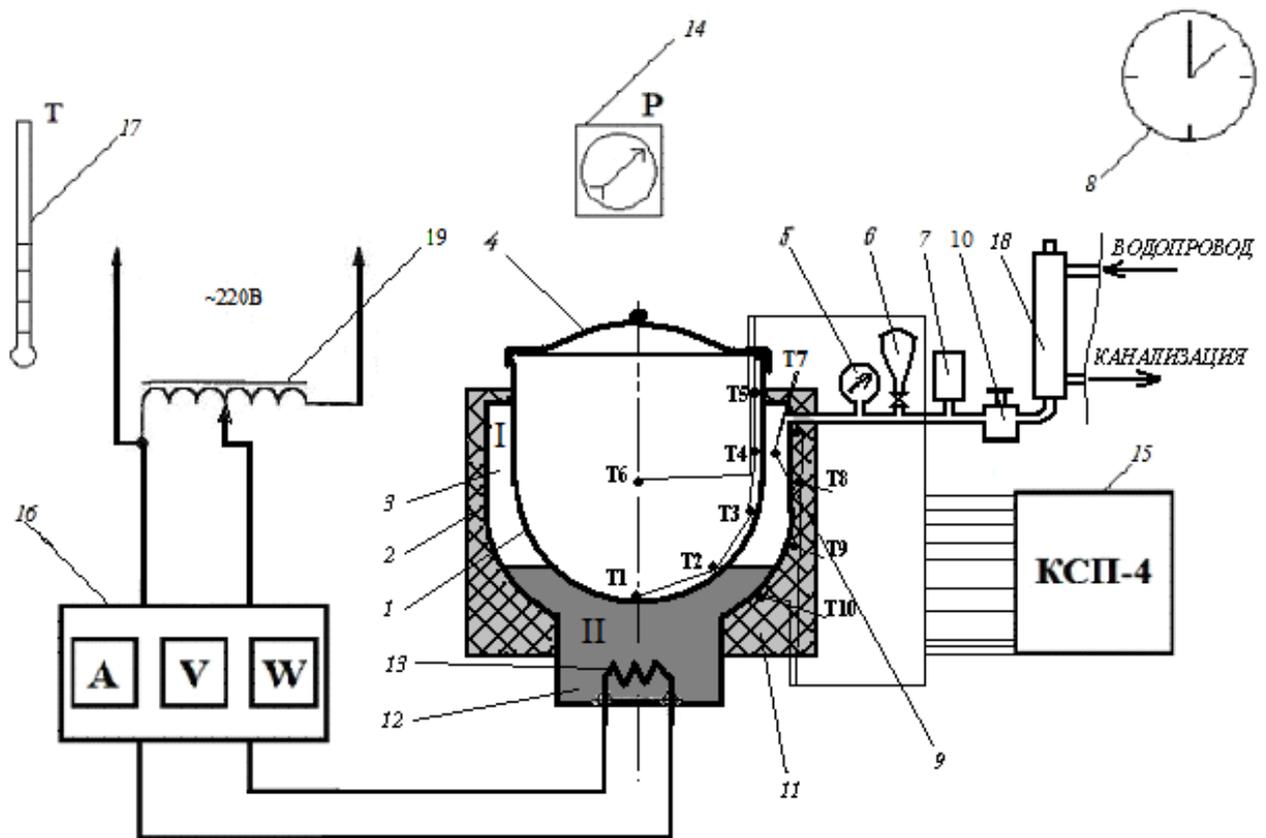


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема экспериментальной установки для испытания перспективных промежуточных теплоносителей:

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 - Секундомер; 9 – горячие спаи хромель-копелевых термопар (Т1-Т11); 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 TDGC2-5к.

3.2 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 температуры рабочей жидкости (Т1, Т6), стенки варочного сосуда (Т2-Т5), а также ограждений греющей рубашки (Т8-Т10) и пара (Т7) Измерялось время эксперимента; мощность, затраченная на разогрев, фиксировалась с помощью амперметра и вольтметра, включенных цепь греющих тэнов. 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 стандартным объемом теплоносителя в качестве двухфазного. 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. Данный случай теплообмена изучен, имеются надежные данные в научно-технической литературе [20, 32, 33]. Полученные экспериментальные данные подтвердили точность эксперимента и послужили основой для анализа теплообмена при использовании водных растворов пропиленгликоля.

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 проходит герметично припаянная к цилиндру медная трубка, одним концом плотно крепящаяся к выходному отверстию рубашки, другой же конец трубки 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 пропорционально, при изменении мощности от минимальной до максимальной при помощи включенного в цепь лабораторного регулируемого автотрансформатора (ЛАТР TDGC2-5k). В других экспериментах нагрев осуществлялся на одной 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

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (14),$$

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t \cdot \tau} \quad (15),$$

где: K - коэффициент теплопередачи от пара к нагреваемой воде, Вт/(м²·К);
 F – площадь поверхности греющей рубашки варочного котла, м²; Δt - средняя по времени разность температур греющего пара и нагреваемой среды; τ - продолжительность процесса, с.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{см}} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_{ж}}} \quad (16),$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К)

$\alpha_{см}$ – коэффициент теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда, Вт/(м²·К);

$\alpha_{ж}$ - коэффициент теплоотдачи от стенки варочного сосуда к пищевой среде, Вт/(м²·К);

λ - коэффициент теплопроводности стенки варочного сосуда, Вт/(м·К);

δ – толщина стенки, м.

Термическим сопротивлением стенки варочного сосуда λ/δ , изготовленной из нержавеющей стали и толщиной 2 мм, по малости пренебрегали.

Для определения $\alpha_{ж}$ использовались данные ранее проведенных исследований. Теплообмен между стенкой варочного сосуда и нагреваемой жидкостью хорошо изучен [20, 33, 86] и с погрешностью не более 5% описывается критериальным уравнением подобия $Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33}$ [86], где Nu – критерий Нуссельта, Gr – критерий Грасгофа, Pr – критерий Прандтля

Полученные в ходе экспериментов коэффициенты теплоотдачи сопоставлялись с коэффициентами теплоотдачи, вычисленными аналитически.

Значение $\alpha_{ж}$ определялось по значению Nu по соотношению

$$\alpha_{ж} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{c(Gr \cdot Pr)^n \cdot \lambda}{l} \quad (17),$$

$C=0,15$ и $n=1/3$; – коэффициент, зависящий от режима течения жидкости; l – высота рубашки, м; $Gr = \frac{gl^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2}$, где g — ускорение свободного падения, м/с²;
 t_c — температура поверхности теплообмена, К; t_0 — температура теплоносителя, К;
 ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; β — температурный

коэффициент объёмного расширения теплоносителя, $1/K$; $Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$, где η – динамическая вязкость.

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке варочного сосуда $\alpha_{ст}$ определялся из соотношения (3) по значениям коэффициента теплопередачи K и $\alpha_{ж}$.

Результаты сравнительного анализа позволили сделать выводы о сопоставимости теплотехнических характеристик предложенных теплоносителей с аналогичными, используемыми в тепловой аппаратуре предприятий общественного питания, и соответственно, их работоспособности и эффективности.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ИХ ОБРАБОТКА И ОБОБЩЕНИЕ.

Были проведены экспериментальные исследования пяти видов промежуточных теплоносителей: воды, чистого пропиленгликоля, 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 с минимальной до той, при которой пищевая среда в котле закипает.

Опыты проводились в диапазоне давлений от 0 до 0,75 бар в зависимости от типа теплоносителя и герметичности рубашки котла. Варочный сосуд был заполнен водой на 70%, то есть 0,007 м³.

На рисунке 4.1 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя вода при максимальной мощности нагревательного элемента и нормальном заполнении рубашки – 0,0015 м³

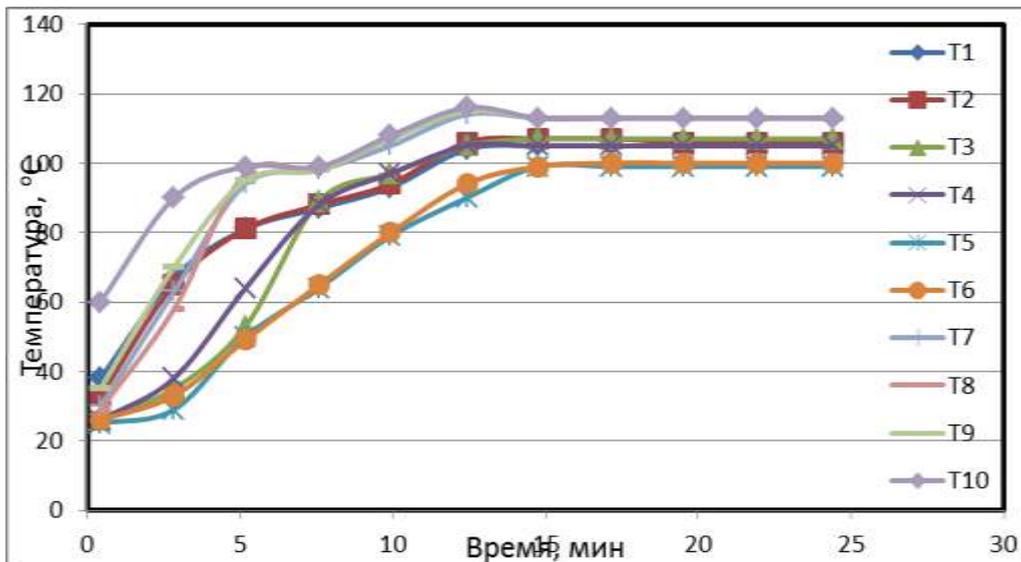


Рисунок 4.1 - Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя вода при максимальной мощности нагревательного элемента.

На рисунке 4.2 представлена зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для того же эксперимента.

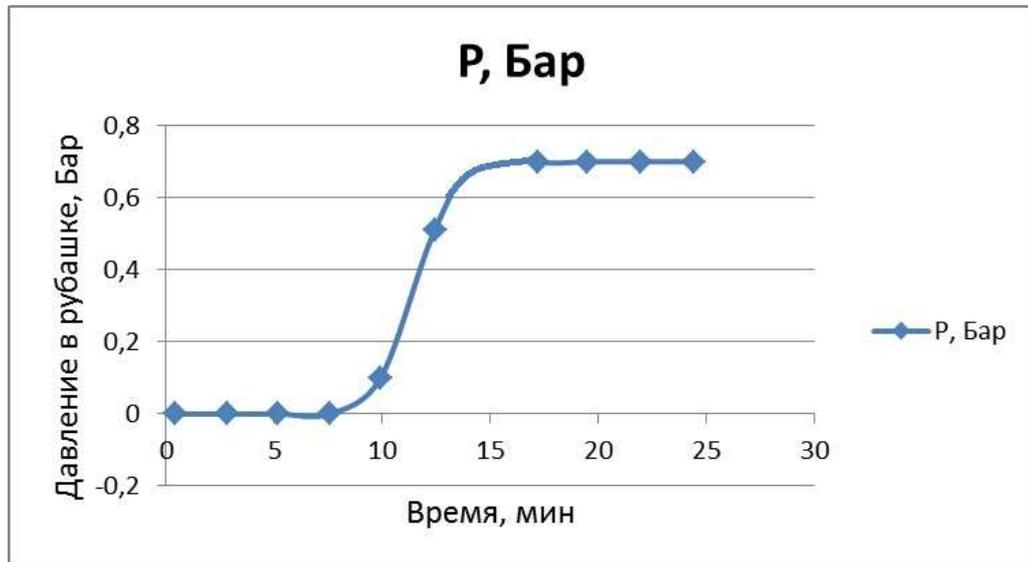


Рисунок 4.2 - Зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для теплоносителя вода при максимальной мощности нагревательного элемента.

Вода повсеместно используется в качестве основного промежуточного двухфазного теплоносителя в рубашечных аппаратах предприятий общественного питания. Вода является стандартным теплоносителем для котлов фирмы Groen. Графики зависимостей температуры и давления от времени эксперимента для воды можно принять в качестве эталонных.

На рисунке 4.3 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 48%-го водного раствора пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента и нормальном заполнении рубашки – 0,0015 м³.

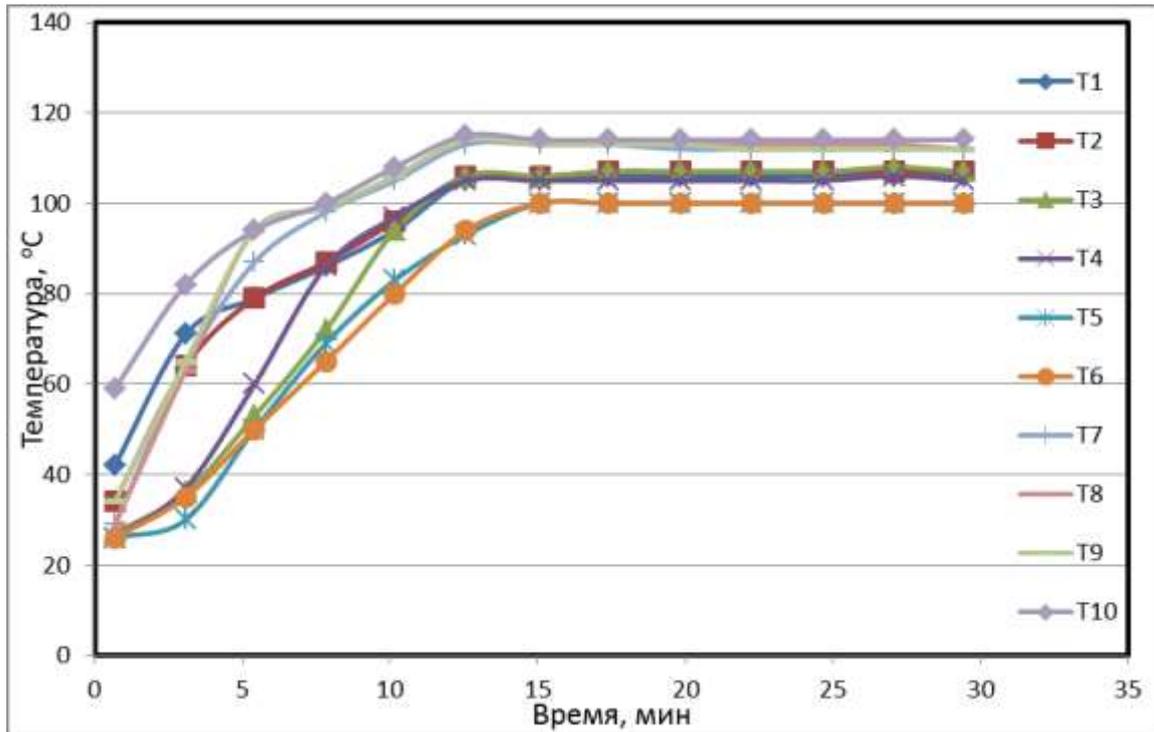


Рисунок 4.3 - Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 48% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

На рисунке 4.4 представлена зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для того же эксперимента.

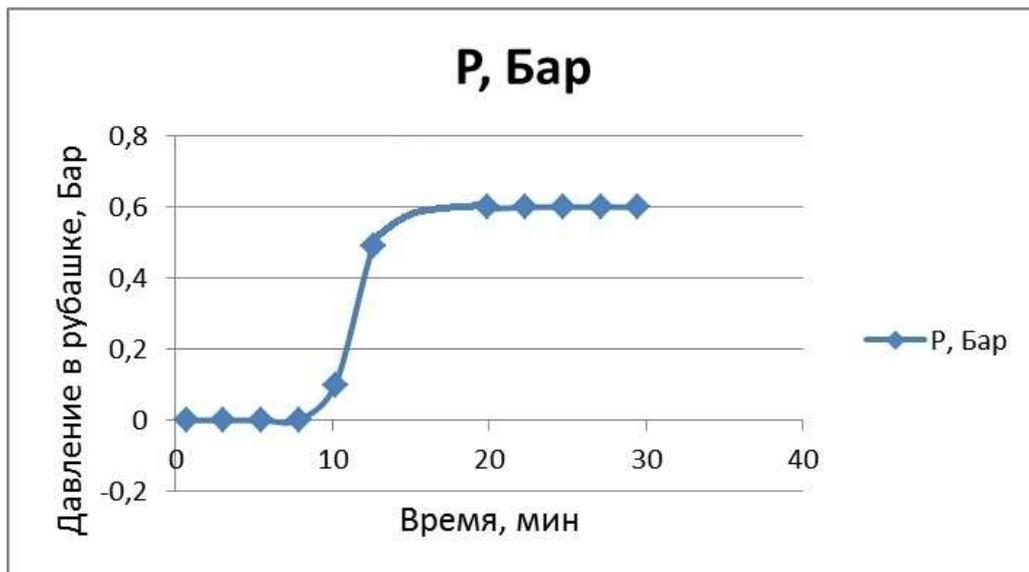


Рисунок 4.4 - Зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для теплоносителя 48% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

Как видно из графиков на рисунках 4.1 и 4.3, время закипания пищевой среды в котле и температурные поля в экспериментах с теплоносителями водой и 48%-м водным раствором пропиленгликоля очень близки. Давление же, как видно из графиков на рисунках 4.2 и 4.4 в эксперименте с раствором пропиленгликоля так же идентично давлению, зарегистрированному в эксперименте с водой, и достигает своего максимума в 0,75 бар.

В следующем эксперименте в качестве промежуточного теплоносителя так же применялся 48%-й водный раствор пропиленгликоля, однако ручка регулятора мощности электронагревателя в течении всего времени эксперимента была установлена в положение 4 – средняя мощность.

На рисунке 4.5 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 48%-го водного раствора пропиленгликоля при средней мощности

нагревательного элемента и нормальном заполнении рубашки – 0,0015 м³. На рисунке 4.6 представлена зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для того же эксперимента.

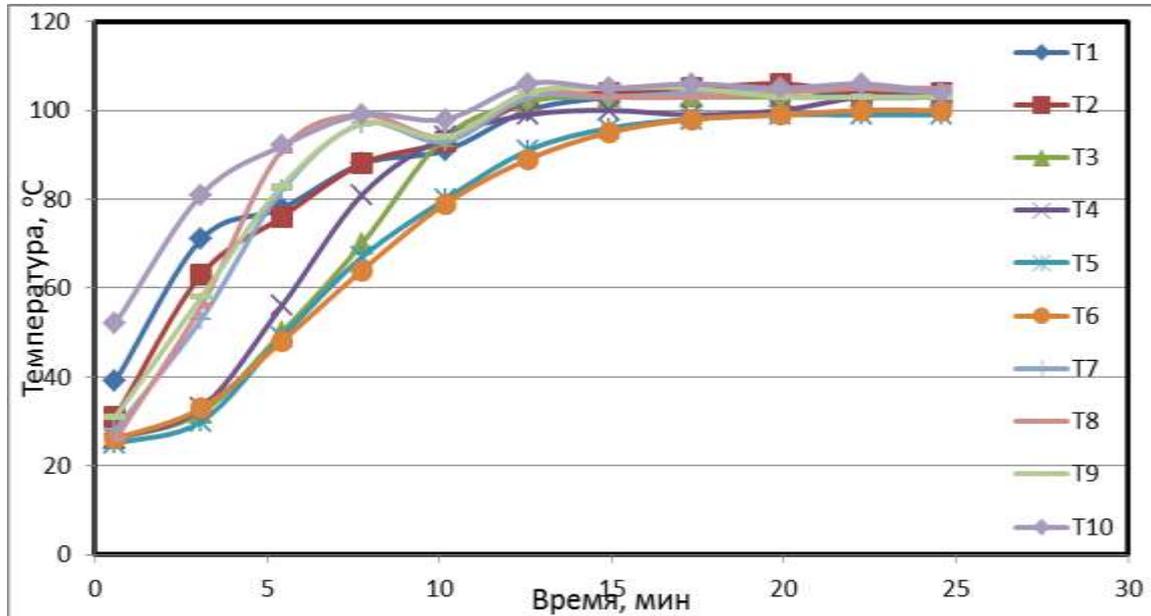


Рисунок 4.5 - Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 48% водный раствор пропиленгликоля при средней мощности нагревательного элемента.

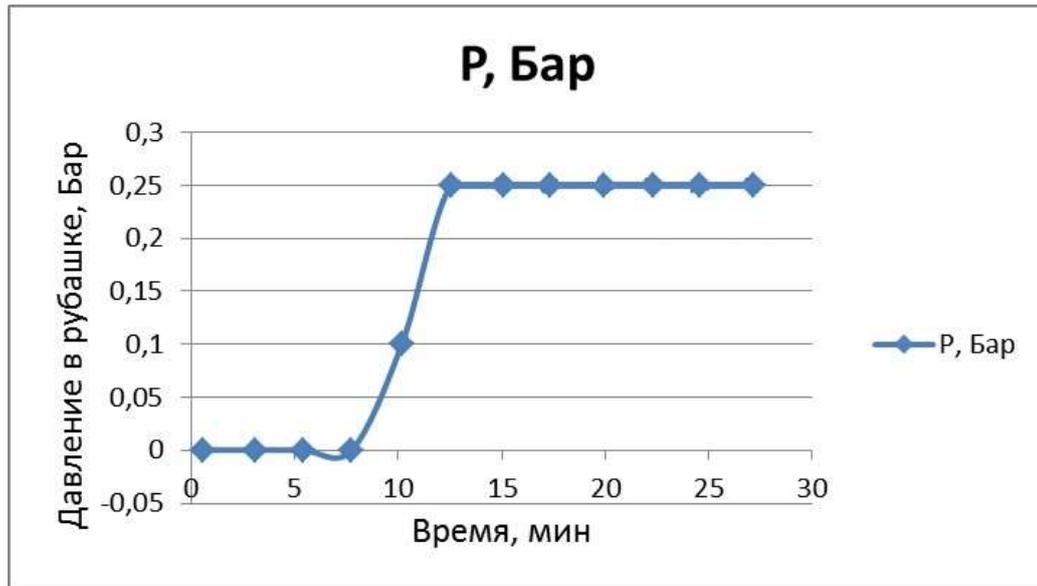


Рисунок 4.6 - Зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для теплоносителя 48% водный раствор пропиленгликоля при средней мощности нагревательного элемента.

Как видно из графика на рисунке 4.5, температурные поля в эксперименте с 48%-м водным раствором пропиленгликоля в качестве промежуточного теплоносителя при средней мощности нагревательного элемента сохраняют те же тенденции, что и в эксперименте с тем же теплоносителем, но на максимальной мощности нагревательного элемента, хоть и не идентичны. Время закипания пищевой среды, однако, в эксперименте на средней мощности нагревателя на 53% больше, чем в эксперименте на максимальной мощности. Как видно из графика на рисунке 4.6, давление в рубашке котла гораздо меньше в эксперименте, проводимом на средней мощности нагревательного элемента, и не превышает в своем максимальном значении 0,25 бар, что на 67% меньше чем давление в рубашке котла при использовании того же теплоносителя или воды на максимальной мощности нагревательного элемента.

Сильное снижение давления в рубашке котла – положительная тенденция, однако время разогрева котла до начала кипения пищевой среды при таком режиме разогрева слишком сильно увеличивается. Стремясь снизить время

разогрева котла до начала кипения пищевой среды, в состав теплоносителя было добавлено больше пропиленгликоля, до его 55%-й концентрации.

На рисунке 4.7 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 55%-го водного раствора пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента и нормальном заполнении рубашки – 0,0015 м³.

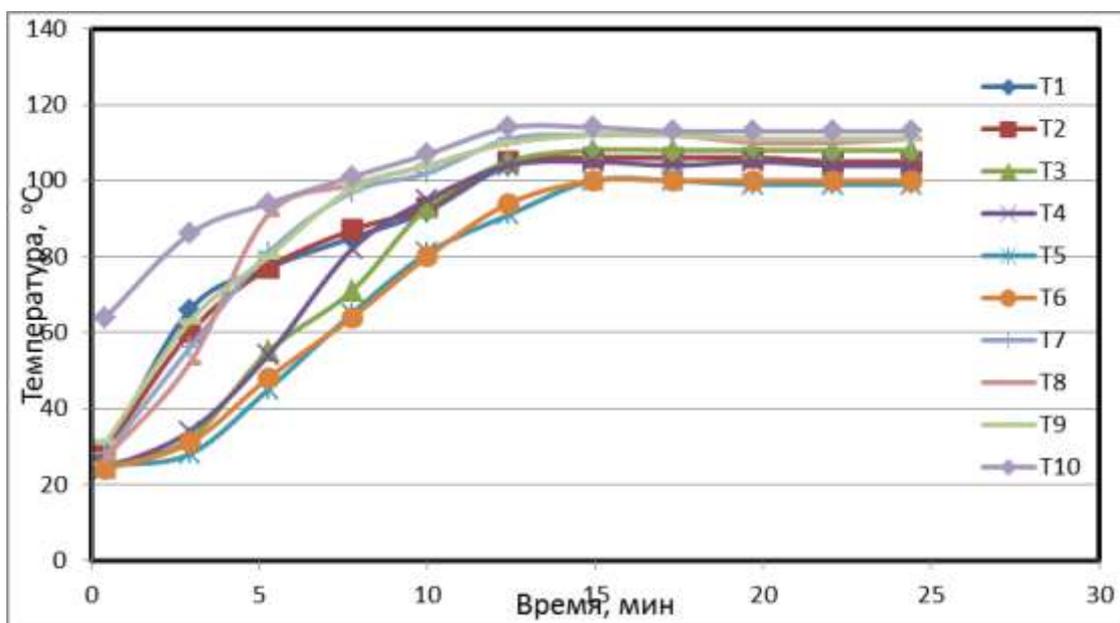


Рисунок 4.7 – Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 55% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

На рисунке 4.8 представлена зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для того же эксперимента.

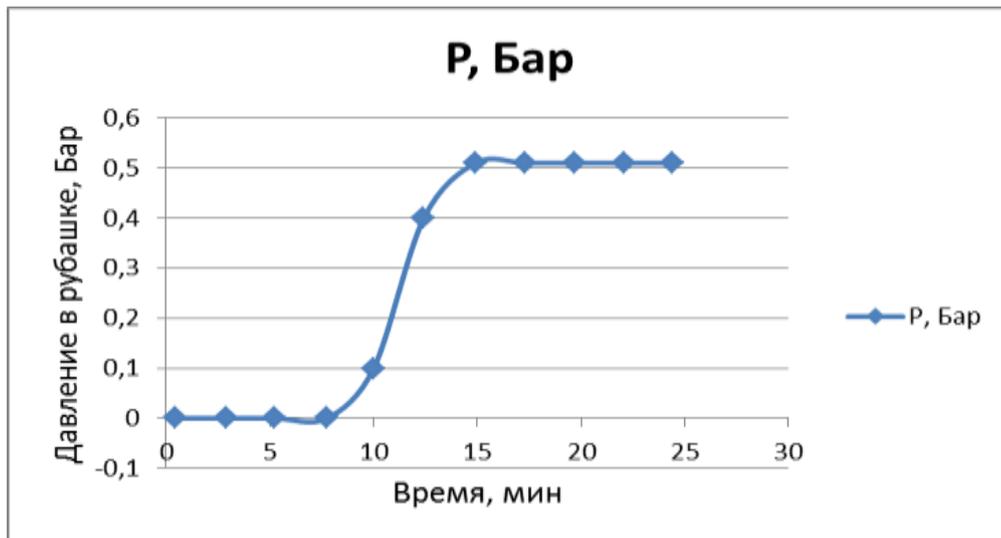


Рисунок 4.8 - Зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для теплоносителя 55% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

Как видно из графиков на рисунках 4.1 и 4.7, время закипания пищевой среды в котле и температурные поля в экспериментах с теплоносителями водой и 55%-м водным раствором пропиленгликоля очень близки. Давление же, как видно из графиков на рисунках 4.2 и 4.8 в эксперименте с раствором пропиленгликоля достигает более низких отметок, чем в эксперименте с водой и не превышает 0,5 бар, так как давление в эксперименте с водой и 48% водным раствором пропиленгликоля в качестве промежуточного теплоносителя на максимальной мощности нагревательного элемента достигает в определенный момент 0,75 бар.

Чтобы еще больше снизить давление в рубашке котла, в следующем эксперименте в качестве промежуточного теплоносителя так же применялся 55%-й водный раствор пропиленгликоля, однако ручка регулятора мощности электронагревателя в течении всего времени эксперимента была установлена в положение 3 – средняя мощность.

На рисунке 4.9 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и

газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 55%-го водного раствора пропиленгликоля при средней мощности нагревательного элемента и нормальном заполнении рубашки – 0,0015 м³. На рисунке 4.10 представлена зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для того же эксперимента.

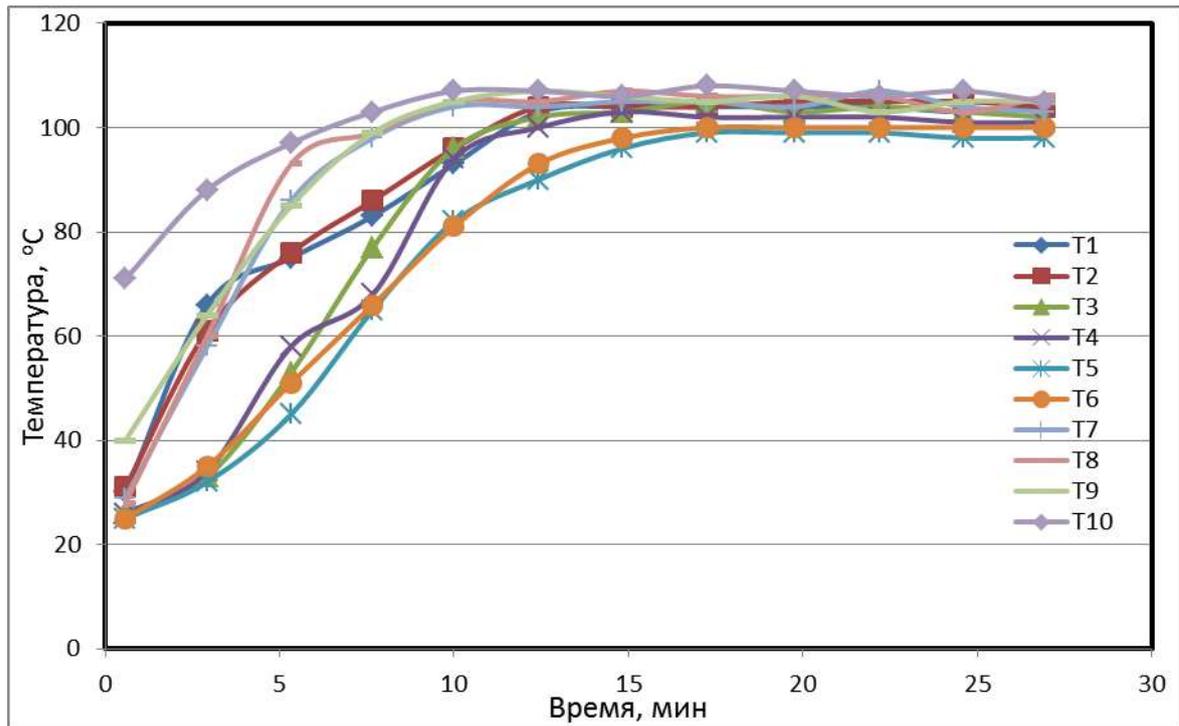


Рисунок - 4.9 Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 55% водный раствор пропиленгликоля при средней мощности нагревательного элемента.

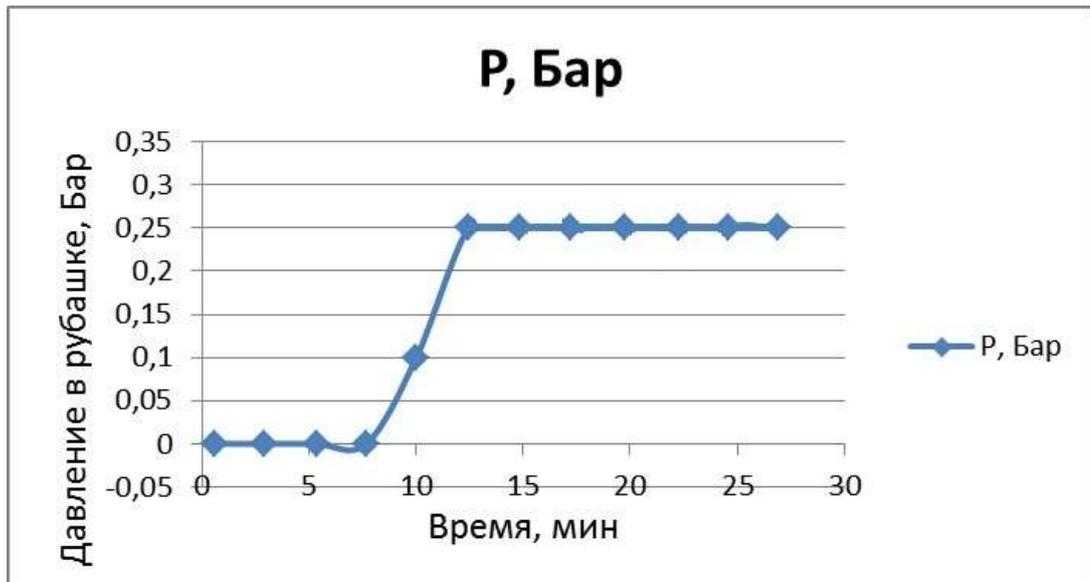


Рисунок 4.10 - Зависимость давления внутри рубашки котла от времени разогрева для теплоносителя 55% водный раствор пропиленгликоля при средней мощности нагревательного элемента.

Как видно из графика на рисунке 4.9, температурные поля в эксперименте с 55%-м водным раствором пропиленгликоля в качестве промежуточного теплоносителя при средней мощности нагревательного элемента сохраняют те же тенденции, что и в эксперименте с тем же теплоносителем, но на максимальной мощности нагревательного элемента, хоть и не идентичны. Время закипания пищевой среды, однако, в эксперименте на средней мощности нагревателя на 28% больше, чем в эксперименте на максимальной мощности. Как видно из графика на рисунке 4.10, давление в рубашке котла напротив, гораздо меньше в эксперименте, проводимом на средней мощности нагревательного элемента, и не превышает в своем максимальном значении 0,3 бар, что на 40% чем давление в рубашке котла при использовании того же теплоносителя на максимальной мощности нагревательного элемента и на 60% меньше, чем при использовании в качестве промежуточного теплоносителя воды на максимальной мощности нагревательного элемента. Такое серьезное понижение давления в рубашке

пищеварочного котла было бы невозможным при использовании воды в качестве двухфазного промежуточного теплоносителя, так при таком давлении температура кипения воды не может достичь необходимого значения в 110°C , а следовательно пищевая среда в котле не может достичь температуры кипения.

Так же был проведен ряд экспериментов, при которых заливочная горловина рубашки котла не закрывалась предохранительным клапаном, рубашка котла не была герметизирована и сообщалась с атмосферой. Закипание пищевой среды в котле в этом случае наблюдалось только при использовании в качестве промежуточного теплоносителя 80%-го водного раствора пропиленгликоля. Рубашка в этом эксперименте заполнялась полностью, то есть на $0,0035\text{м}^3$

На рисунке 4.11 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 80%-го водного раствора пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента и полном заполнении рубашки – $0,0035\text{ м}^3$ при атмосферном давлении в рубашке котла.

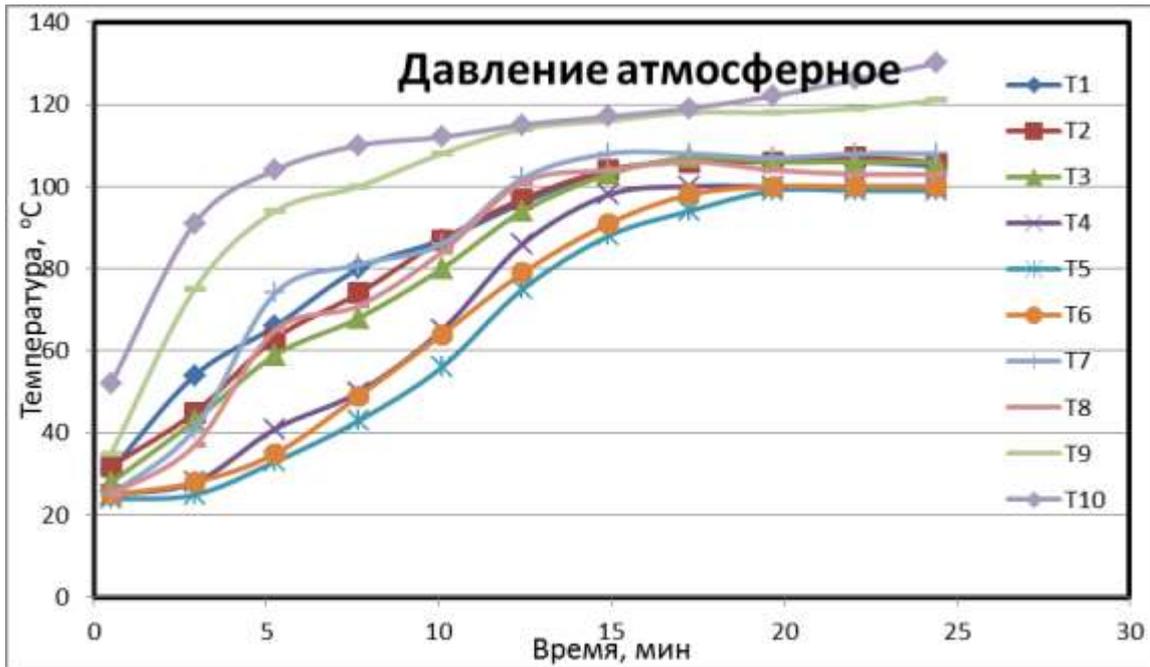


Рисунок - 4.11 Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 80% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

Как видно из графиков на рисунке 4.11, в целом температурные поля в эксперименте с 80% водным раствором пропиленгликоля в качестве промежуточного теплоносителя, по большей части схожи с экспериментами с водой, 48% и 55% водным раствором пропиленгликоля, однако температура жидкого теплоносителя в нижней части рубашки, рядом с нагревательным элементом значительно выше, чем в предыдущих экспериментах и достигает 130°C, в то время как в предыдущих экспериментах не поднималась выше 115°C. Время разогрева до начала кипения пищевой среды составляет 18 минут и идентично времени разогрева при использовании 55% водного раствора пропиленгликоля на средней мощности котла, что на 28% больше времени разогрева в экспериментах с водой и 48% и 55% водным раствором пропиленгликоля на максимальной мощности нагревательного элемента.

В следующем эксперименте в качестве промежуточного теплоносителя так же применялся 80% водный раствор пропиленгликоля, рубашка так же была не герметична, однако в процессе разогрева мощность нагревательного элемента повышалась с минимальной 1-й до максимальной 6-й. Повышение происходило в тот момент, когда встроенный термостат котла отключал нагревательный элемент по достижении определенной температуры. При повышении мощности на следующую ступень нагревательный элемент вновь включался.

На рисунке 4.12 представлены зависимости температуры пищевой среды, внутренней стенки варочного сосуда, а также температур жидкого и газообразного теплоносителя от времени проведения эксперимента для теплоносителя 80%-го водного раствора пропиленгликоля при постепенном повышении мощности нагревательного элемента с минимальной до максимальной и полном заполнении рубашки – 0,0035 м³ при атмосферном давлении в рубашке котла.

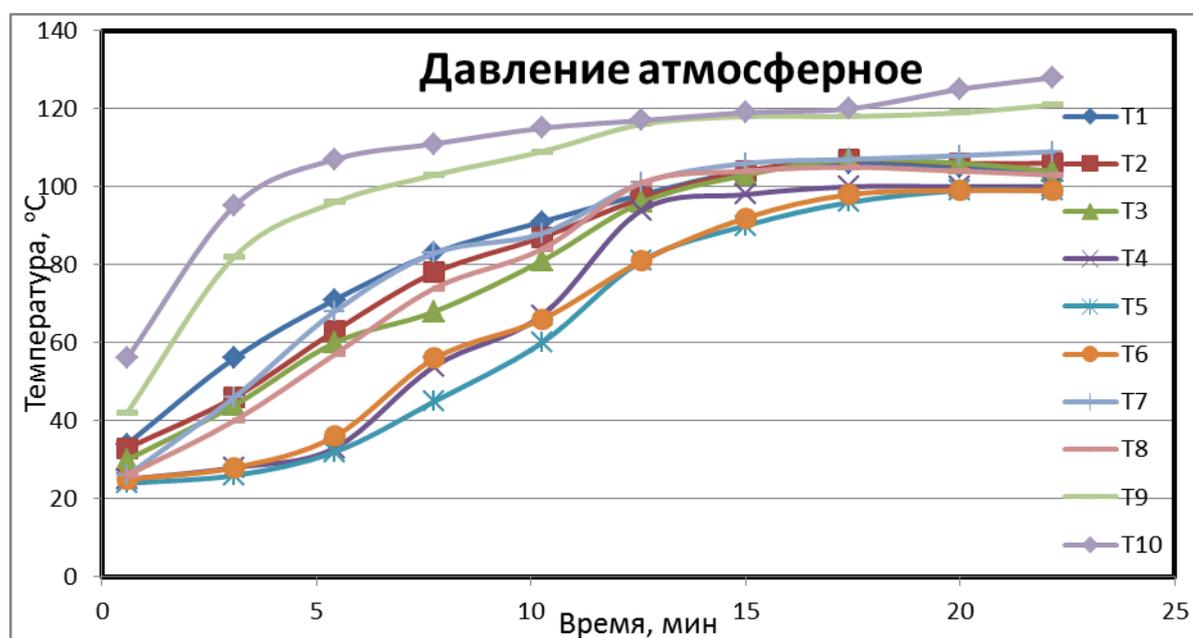


Рисунок 4.12 - Зависимость температуры пищевой среды, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя 80% водный раствор пропиленгликоля при максимальной мощности нагревательного элемента.

Как видно из графиков на рисунках 4.11 и 4.12, несмотря на то, что в экспериментах нагревательный элемент разогревался в разных последовательностях, температурные поля в обоих экспериментах достаточно близки. Однако, в случае с постепенным повышением мощности нагревательного элемента наблюдается более плавный рост температуры паров теплоносителя. Температура закипания пищевой среды в котле в обоих экспериментах совпадает, и составляет 18 минут, что идентично времени закипания пищевой среды при использовании в качестве промежуточного теплоносителя 55% водного раствора пропиленгликоля и на 28% больше, чем при использовании в качестве промежуточного теплоносителя воды.

Высокая температура кипения чистого пропиленгликоля, составляющая 189 °С, позволяет предположить, что данный теплоноситель в чистом виде сможет работать в рубашках жарочных аппаратов предприятий общественного питания, в частности во фритюрницах с косвенным обогревом. На сегодняшний день во фритюрницах с косвенным обогревом в качестве промежуточного теплоносителя применяются различные виды минеральных масел. Использование пропиленгликоля в фритюрницах и сковородах с косвенным обогревом позволяет сделать данный теплоноситель универсальным. Чистый или разбавленный водой пропиленгликоль сможет применяться в широком спектре теплового оборудования с косвенным обогревом на предприятиях общественного питания, а также в качестве теплоносителя жидкостной системы отопления предприятий, благодаря хорошей теплоотдаче и низкой температуре замерзания.

Пред началом эксперимента рубашка котла была полностью заполнена чистым пропиленгликолем, объемом 3,5 литра. Варочная полость котла была заполнена фритюром – рафинированным подсолнечным маслом, объемом 7 литров. Нагрев котла производился при максимальной мощности нагревательного элемента. По достижении фритюром температуры 150 °С, на 20-й минуте эксперимента в варочную полость котла был загружен продукт – картофель,

нарезанный мелкой стружкой - «фри». По достижению картофелем готовности он был извлечен из варочной полости котла.

Зависимость температуры фритюра, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и его паров от времени разогрева котла представлена на рисунке 4.13.

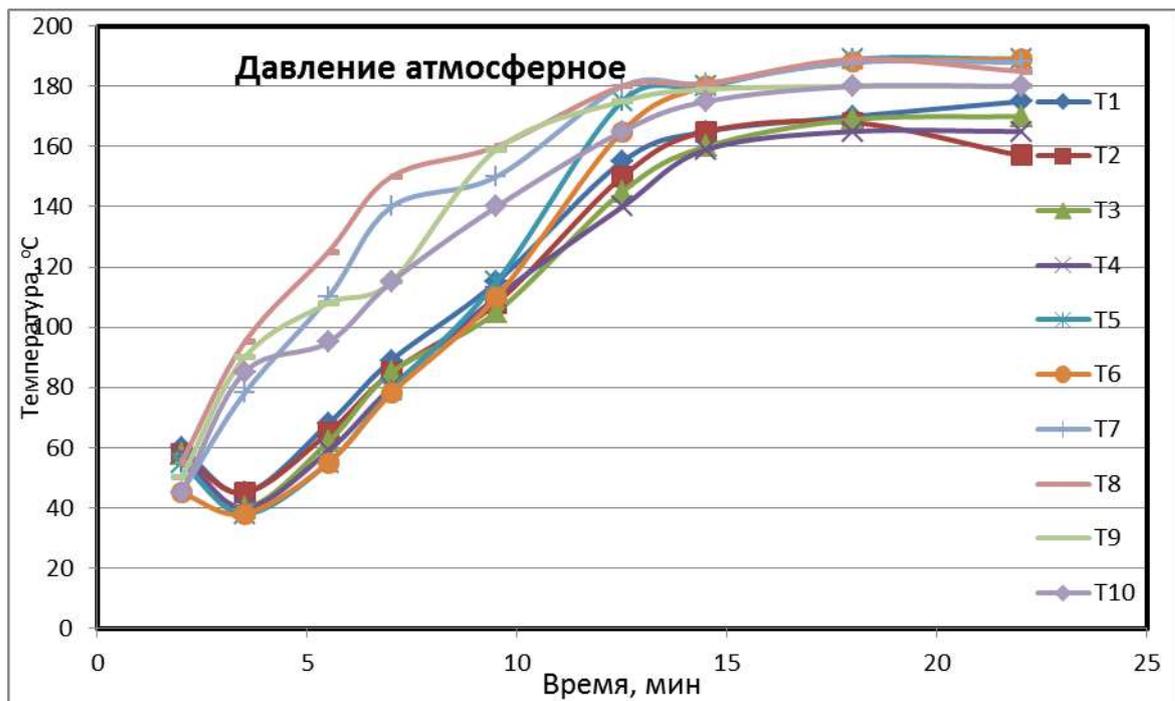


Рисунок 4.13 - Зависимость температуры фритюра, стенки варочного сосуда, жидкого теплоносителя и пара от времени разогрева для теплоносителя чистый пропиленгликоль при максимальной мощности нагревательного элемента

Как видно из графиков на рисунке 4.13, температура фритюра в ходе эксперимента достигла значений 150-180°C, что достаточно для приготовления картофеля, рыбы, курицы и других продуктов. При этом время разогрева фритюра до 180°C сопоставимо с серийно производимыми фритюрницами, например, фритюрница ФЭСМ-20 разогревает фритюр до температуры 180°C за 20 минут.

Внешний вид, вкус и запах приготовленного в ходе эксперимента картофеля признаны соответствующими стандартам для картофеля, обжаренного во фритюре.

Результаты экспериментальных исследований различных теплоносителей на основе водных растворов пропиленгликоля, приведенные выше, показывают, что данные теплоносители могут успешно применяться в тепловых технологических аппаратах предприятий общественного питания. Использование в качестве промежуточных теплоносителей водных растворов пропиленгликоля позволяет снизить давление в рубашке до значений 0,25 бар, то есть 50% от стандартного для таких аппаратов давления, а также использовать аппараты вовсе без избыточного давления. Применение в качестве однофазного промежуточного теплоносителя чистого пропиленгликоля целесообразно в жарочных аппаратах общественного питания, температура в которых должна достигать 150-190 °С

5. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗОГРЕВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

5.1 Проверка достоверности экспериментов

Приведенные в главе 4 данные показывают, что водные растворы пропиленгликоля различной концентрации могут быть не только успешно использованы в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей в рубашечных тепловых аппаратах предприятий общественного питания, но и могут существенно снизить давление в рубашках пищеварочных котлов, по сравнению с применяемым на сегодняшний день теплоносителем – водяным паром.

Высокая температура кипения чистого пропиленгликоля, составляющая 189 °С, позволяет предположить, что данный теплоноситель в чистом виде сможет работать в рубашках жарочных аппаратов предприятий общественного питания, в частности во фритюрницах с косвенным обогревом. На сегодняшний день во фритюрницах с косвенным обогревом в качестве промежуточного теплоносителя применяются различные виды минеральных масел. Использование пропиленгликоля в фритюрницах и сковородах с косвенным обогревом позволяет сделать данный теплоноситель универсальным. Чистый или разбавленный водой пропиленгликоль сможет применяться в широком спектре теплового оборудования с косвенным обогревом на предприятиях общественного питания, а также в качестве теплоносителя жидкостной системы отопления предприятий, благодаря хорошей теплоотдаче и низкой температуре замерзания.

Для подтверждения достоверности эксперимента был проведен базовый эксперимент с использованием в качестве промежуточного теплоносителя воды, результаты которого необходимо было сравнить с результатами экспериментов, описанных в предыдущих работах по данной тематике. Исследованию

теплообменных процессов, происходящих внутри пищеварочных аппаратах с косвенным обогревом посвящены многие работы, в частности В.Я. Груданова[42, 47], В.А. Дорохина[33], Л.А. Минухина[82]. Но наиболее полно исследования теплообменных процессов серийно выпускаемых пищеварочных котлов представлены в работе С.В. Шихалева [136]. Поэтому результаты установочного эксперимента были сопоставлены с результатами, полученными в процессе исследования серийно выпускаемых пищеварочных котлов с косвенным обогревом.

Ниже приведено сопоставление зависимостей коэффициентов теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_{см}$ и величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ а так же зависимостей величины теплового потока q от разности температур пара и стенки греющего сосуда Δt для базового эксперимента и эксперимента, выполненного при исследовании серийно выпускаемых котлов. Вычисление производились по методике, предложенной С.В. Шихалевым и Л.А. Минухиным [82;83;84].

Тепловой поток определялся из уравнения теплового баланса, по выражению

$$q = \frac{G \cdot c \cdot (t_{ж,i+1} - t_{ж,i}) + Q_{ном.}}{F \cdot \Delta\tau}, \quad (18)$$

Где: G – масса продукта, кг, c – удельная теплоемкость продукта, Дж/кг, F – площадь поверхности теплопередающей стенки, m^2 , $\Delta\tau$ - 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 тепла аппаратом за временной интервал $\Delta\tau$, Вт

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

$$K = \frac{q}{t_{см,\tau} - t_{ж,\tau}}, \quad (19)$$

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

$$\alpha_{см,\tau} = \frac{q}{t_{см,\tau} - t_{ex}}, \quad (20)$$

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

$$\alpha_{жс,\tau} = \frac{q}{t_{in} - t_{жс,\tau}}, \quad (21)$$

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

Графики, сопоставляющие результаты исследований С.В. Шихалева с результатами установочного эксперимента представлены на рисунках 5.1-5.3.

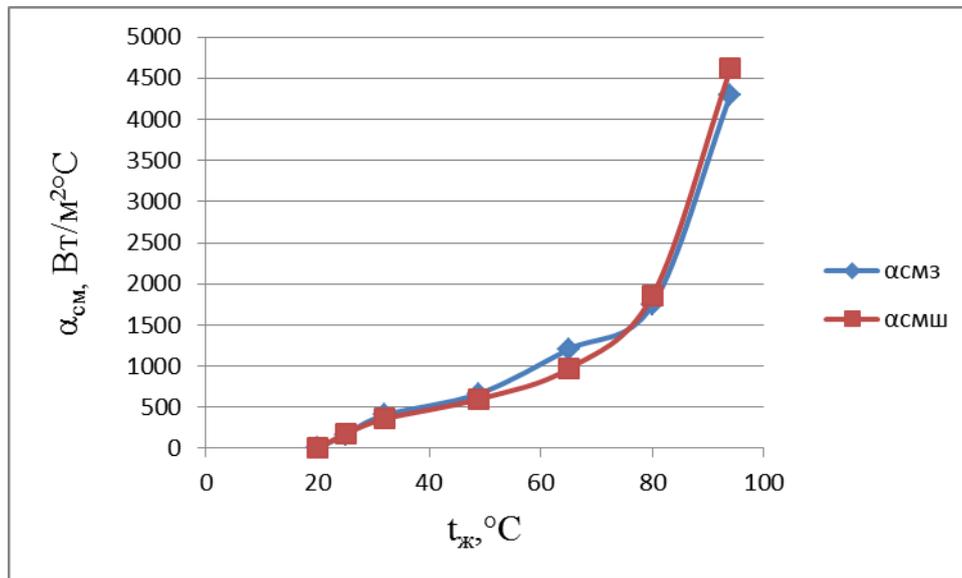


Рисунок 5.1 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителя вода:

$\alpha_{смЗ}$ – результат установочного эксперимента, $\alpha_{смШ}$ – результат исследования [136]

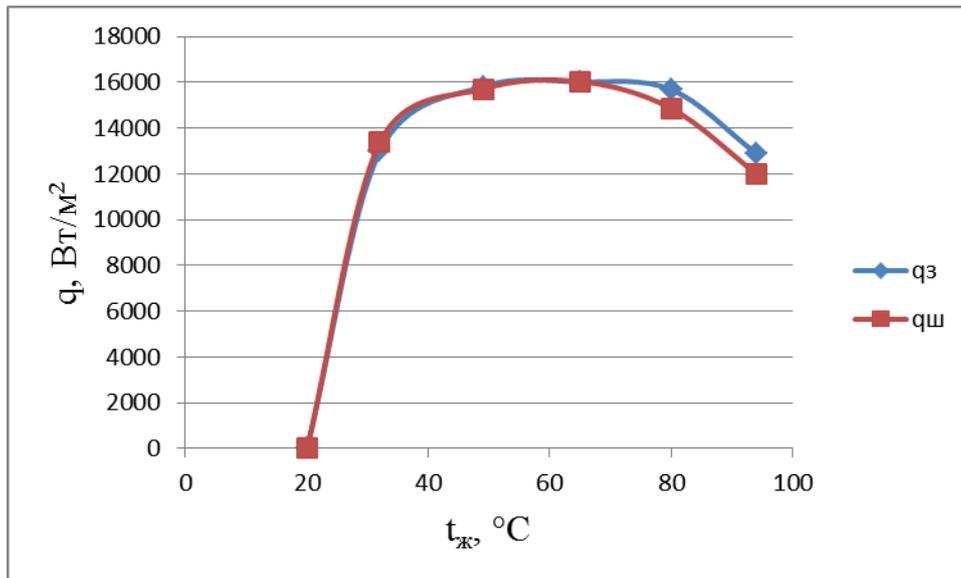


Рисунок 5.2 - Зависимость величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителя вода:

$q_з$ – результат установочного эксперимента, $q_ш$ – результат исследования [136]

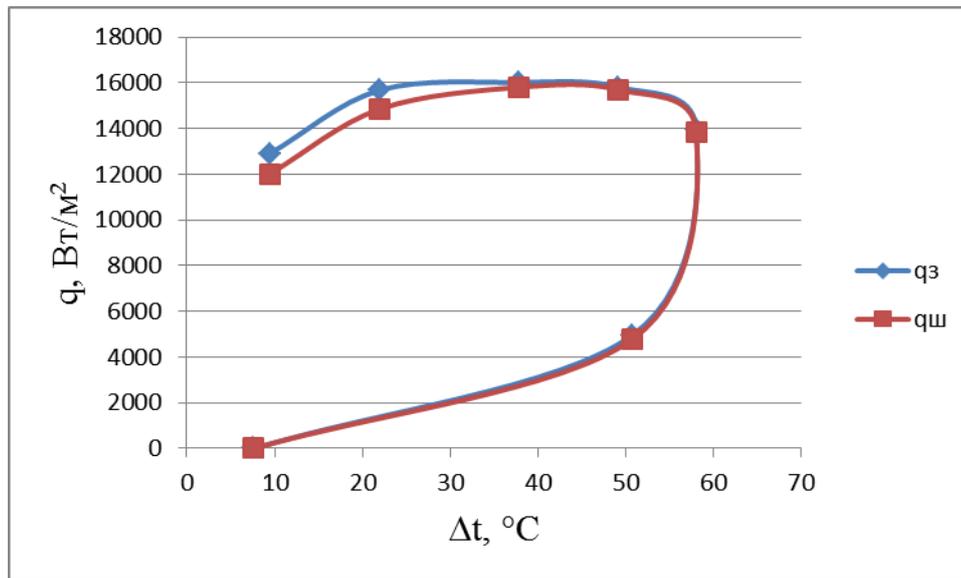


Рисунок 5.3. - Зависимость величины теплового потока q от разницы температур пара и стенки варочного сосуда Δt для теплоносителя вода:

$q_з$ – результат установочного эксперимента, $q_ш$ – результат исследования [136]

Как видно из графиков на рисунках 5.1-5.3, коэффициенты теплоотдачи и величины теплового потока очень близки как в упомянутом выше исследовании,

так и в установочном эксперименте. 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.

5.2 Исследование коэффициентов теплоотдачи

Используя методику представленную выше методику, так же были вычислены зависимости коэффициентов теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_{см}$ и величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ а так же зависимости величины 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. На рисунках 5.4-5.6 представлены графики, сопоставляющие зависимости указанных выше величин для установочного эксперимента и эксперимента, в котором в качестве промежуточного теплоносителя был использован 55% водный раствор пропиленгликоля.

Как видно из графиков на рисунках 5.4-5.6, зависимости коэффициентов теплоотдачи и тепловых потоков для теплоносителей вода и 55% раствор пропиленгликоля сохраняют идентичные тенденции и близки по абсолютным значениям. По сравнительным графикам можно сделать вывод о применимости вышеописанной 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 величины тепловых потоков в обоих экспериментах, можно сделать вывод о применимости водных растворов пропиленгликоля в качестве промежуточных двухфазных теплоносителей в тепловом технологическом оборудовании предприятий общественного питания.

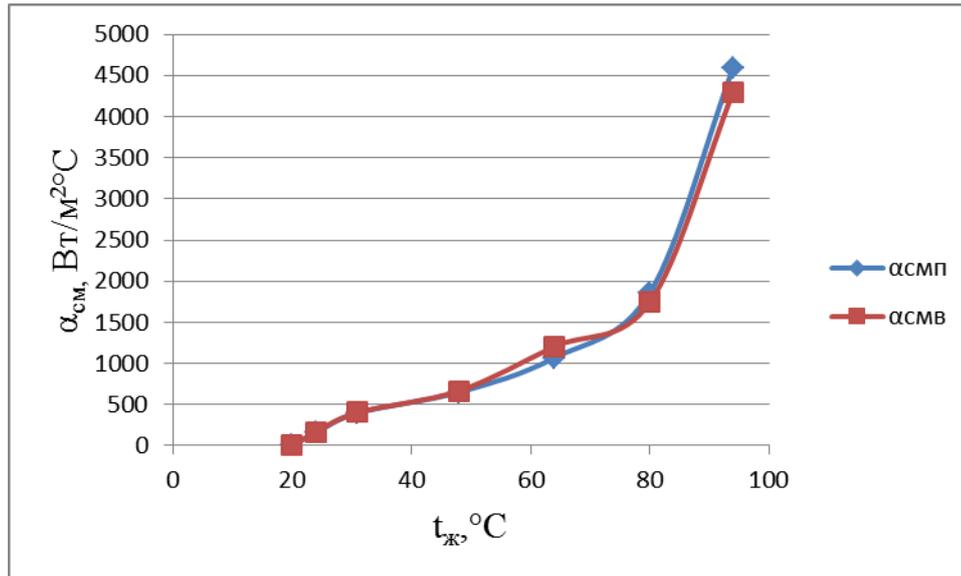


Рисунок 5.4 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей вода ($\alpha_{смв}$) и 55% раствор пропиленгликоля ($\alpha_{смп}$)

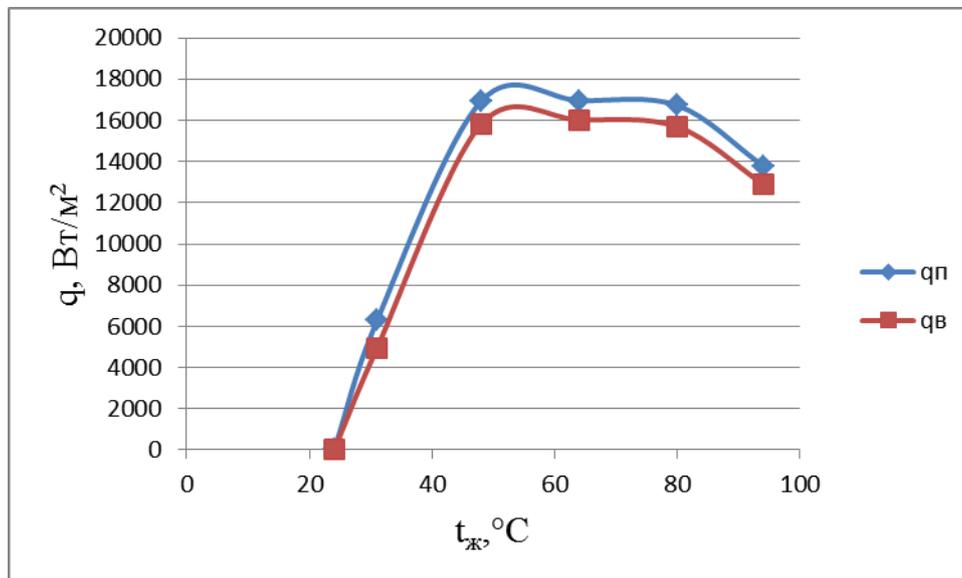


Рисунок - 5.5 Зависимость величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей вода (q_v) и 55% раствор пропиленгликоля (q_p)

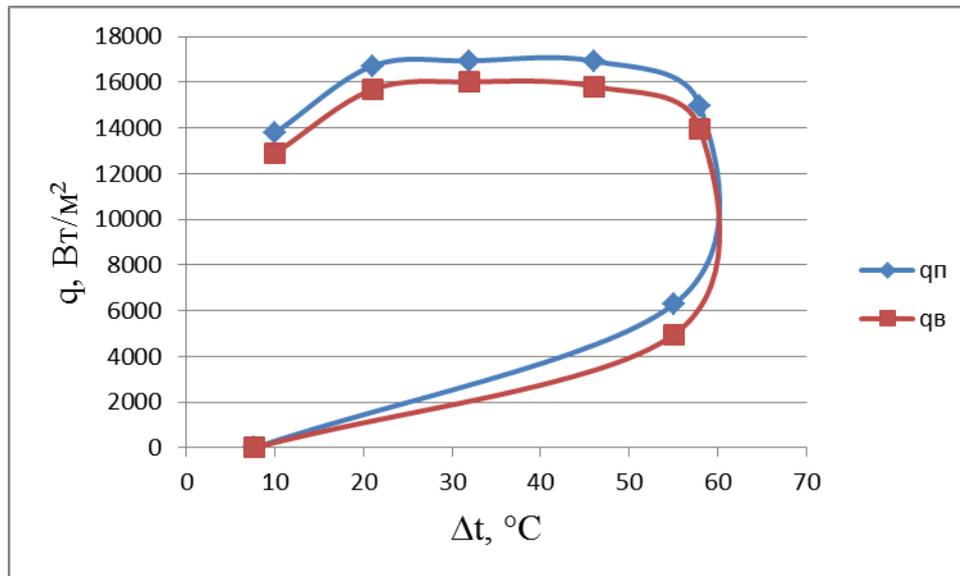


Рисунок 5.6 - Зависимость величины теплового потока q от разницы температур пара и стенки варочного сосуда Δt для теплоносителей вода(q_v) и 55% раствор пропиленгликоля(q_p)

Поскольку в экспериментах, в которых рубашка сообщалась с атмосферой, оптимальное время закипания пищевой среды было зафиксировано при применении в качестве промежуточного теплоносителя 80% водного раствора пропиленгликоля, был проведен расчет коэффициентов теплоотдачи и величины теплового потока для данного теплоносителя и их сравнение с аналогичными показателями для 55% раствора пропиленгликоля.

Ниже на рисунках 5.7 - 5.9 приведены сравнительные графики зависимостей величины теплового потока от разницы температур пара и стенки варочного сосуда, зависимости величины теплового потока от температуры жидкости в пищеварочном сосуде и зависимости коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда от температуры жидкости в пищеварочном сосуде.

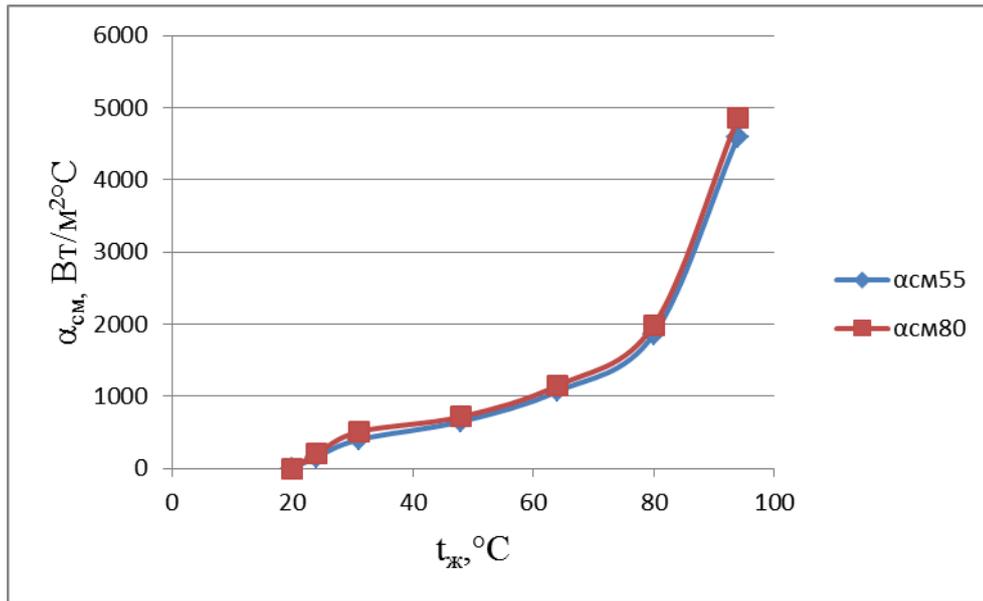


Рисунок 5.7 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей 80% ($\alpha_{см80}$) и 55% водных растворов пропиленгликоля ($\alpha_{см55}$)

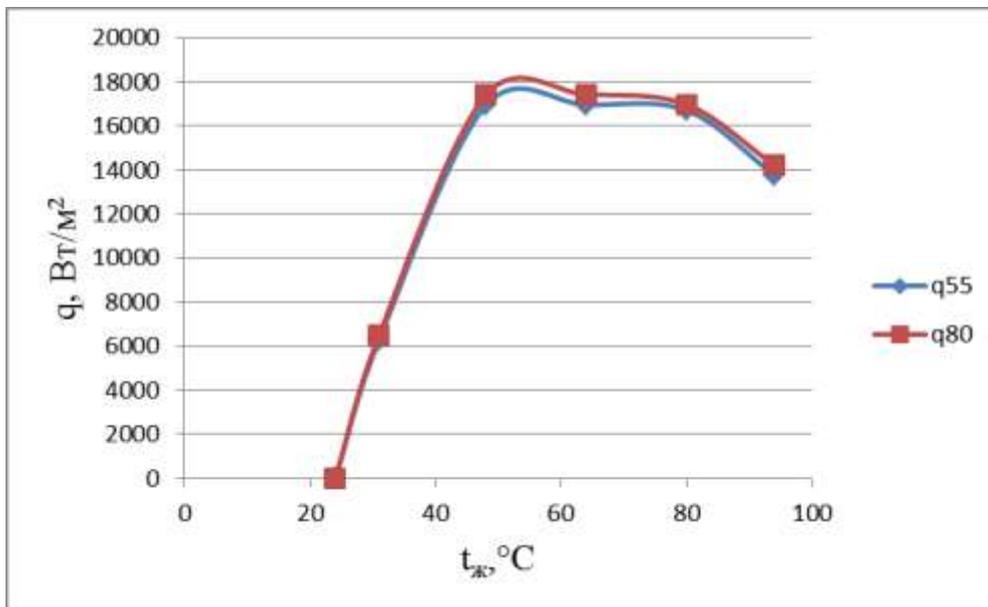


Рисунок 5.8 - Зависимость величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для теплоносителей 80% (q_{80}) и 55% (q_{55}) водных растворов пропиленгликоля

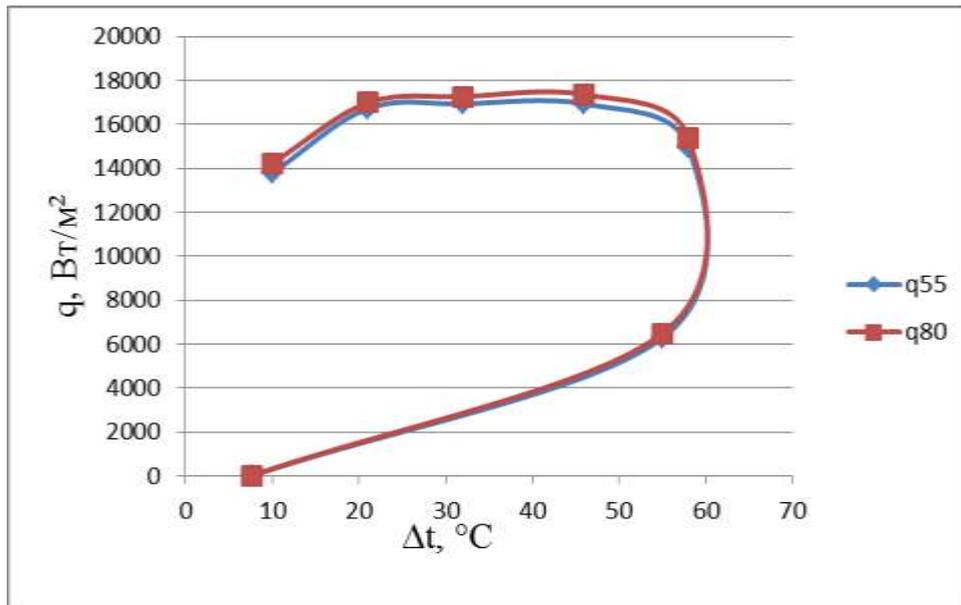


Рисунок 5.9 - Зависимость величины теплового потока q от разницы температур пара и стенки варочного сосуда Δt для теплоносителей 80% (q_{80}) и 55% (q_{55}) водных растворов пропиленгликоля

Как видно из графиков на рисунках 5.7 - 5.9, значения коэффициентов теплоотдачи и величин теплового потока для обоих перспективных теплоносителей близки по абсолютным значениям и сохраняют идентичные тенденции. Следовательно, тепловые процессы в технологических аппаратах общественного питания будут происходить практически при тех же условиях, что и при применении в качестве промежуточного теплоносителя воды, а значит изменения конструкции аппаратов для применения перспективных теплоносителей не требуется. Однако, поскольку тепловые процессы при применении перспективных теплоносителей проходят при атмосферном давлении, возможно уменьшение толщины стенок тепловых технологических аппаратов с греющей рубашкой, а также упрощение их конструкции за счет удаления приборов контроля давления в рубашке и предохранительных клапанов.

Коэффициенты теплоотдачи и величины тепловых потоков были так же рассчитаны для экспериментов, в которых в качестве промежуточного

теплоносителя использовался чистый пропиленгликоль, а варочный сосуд был заполнен рафинированным подсолнечным маслом. В данных экспериментов установка работала в качестве фритюрницы с косвенным обогревом. На рисунках 5.10 - 5.12 приведены графики зависимостей величины теплового потока от разницы температур пара и стенки варочного сосуда, зависимости величины теплового потока от температуры жидкости в пищеварочном сосуде и зависимости коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда от температуры жидкости в пищеварочном сосуде для чистого пропиленгликоля.

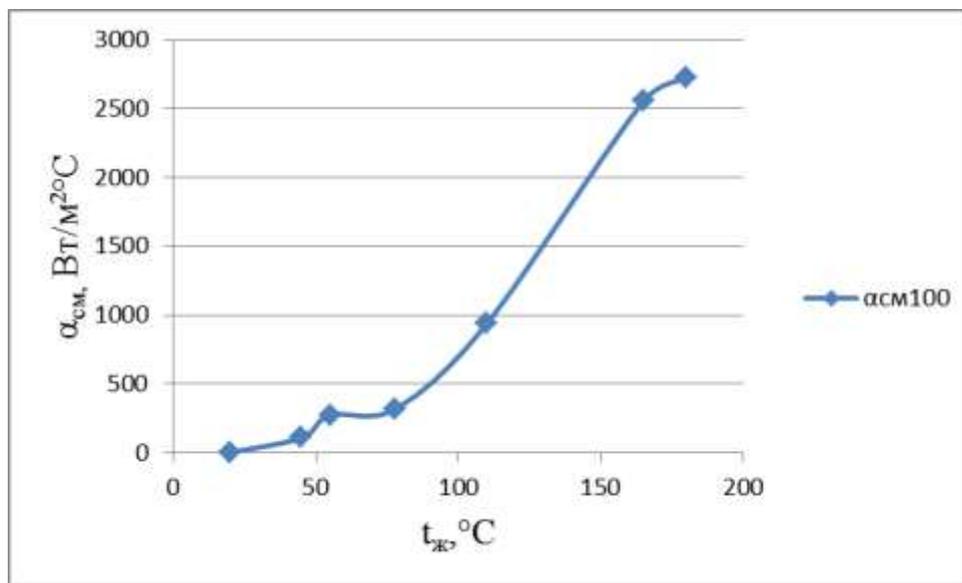


Рисунок 5.10 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к стенке варочного сосуда $\alpha_{см}$ от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{ж}$ для чистого пропиленгликоля.

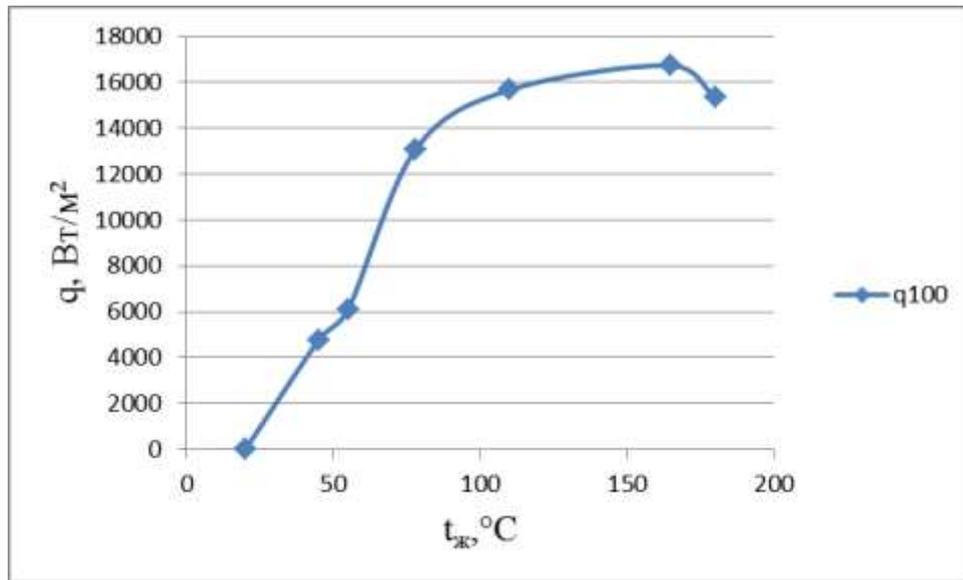


Рисунок 5.11 - Зависимость величины теплового потока q от температуры жидкости в пищеварочном сосуде $t_{\text{ж}}$ для чистого пропиленгликоля

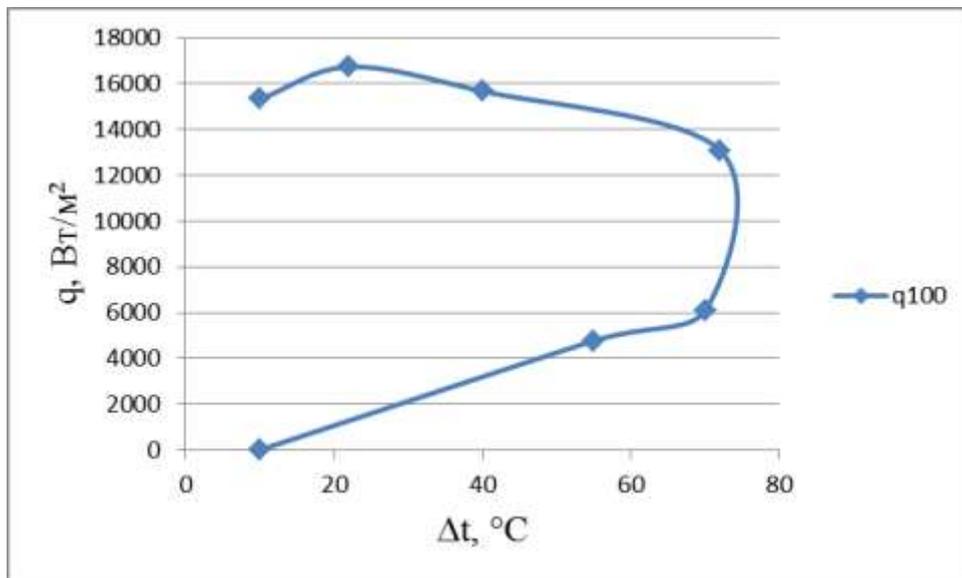


Рисунок 5.12 - Зависимость величины теплового потока q от разницы температур пара и стенки варочного сосуда Δt для чистого пропиленгликоля

Как видно из графиков на рисунках 5.9 - 5.12, зависимости коэффициентов теплоотдачи и величин тепловых потоков как для чистого пропиленгликоля, так и

для его водных растворов близки по абсолютным значениям и сохраняют идентичные тенденции. Несмотря на то, что величина температурного поля в случае с использованием установки в качестве фритюрницы на 80% выше, чем в случае с использованием установки в качестве варочного котла, графики схожи с аналогичными графиками для стандартного промежуточного теплоносителя – воды. Из схожести этих зависимостей можно сделать вывод о возможности применения как чистого пропиленгликоля, так и его водных растворов в качестве промежуточных теплоносителей в рубашечных тепловых аппаратах предприятий питания.

5.3 Экономический эффект от применения перспективных промежуточных теплоносителей

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.
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.

Толщина стенки греющей рубашки и пищеварочного сосуда у серийно выпускаемых котлов, работающих с использованием в качестве промежуточного теплоносителя воды при давлении в рубашке 0,5 бар, обычно составляет 2-2,5 и 3-4 мм соответственно. При снижении давления в рубашке до 0,25 бар можно принять толщину стенки пищеварочного сосуда 1,5 мм и внешней стенки пищеварочной рубашки 2 мм [45].

Металлоемкость экспериментального котла вычисляется по формуле

$$\left[\pi(D_{pб} - s_{pб}) \cdot s_{pб} \cdot h_{pб} + \pi(D_{вс} - s_{вс}) \cdot s_{вс} \cdot h_{вс} + \frac{\pi}{6} h_{емк} \cdot s_{вс} \cdot (h_{емк} + 3D_{вс} - 4s_{вс}) + \frac{\pi}{6} h_{руб} \cdot s_{pб} \cdot (h_{руб} + 3D_{pб} - 4s_{pб}) \right] \cdot \rho_{ст} [\text{кг}], \quad (22)$$

Где: $D_{pб}$, $D_{вс}$ - диаметры соответственно греющей рубашки и варочного сосуда,

$s_{pб}$, $s_{вс}$ - толщина стенки соответственно греющей рубашки и варочного сосуда

$h_{pб}$, $h_{вс}$ - высота цилиндрической части соответственно греющей рубашки и варочного сосуда

$h_{руб}$, $h_{емк}$ - высота сферической части соответственно греющей рубашки и варочного сосуда

$\rho_{ст}$ - плотность стали

Согласно расчетам, при изменении толщины стенки варочного сосуда с 2 до 1,5 мм, а внешней стенки греющей рубашки с 3 до 2 мм, снижение металлоемкости для экспериментального котла достигает 30%. Учитывая массу постаментов и блока управления, масса которых не меняется и составляет 45% общей массы

пищеварочного агрегата, снижении общей массы пищеварочного агрегата составит 16,5%.

Потери тепла на разогрев конструкции аппарата определяются по формуле:

$$Q_{раз} = \sum_{i=1}^{n-1} c_i M_i (t_i^k - t_i^n), [Вт] \quad (23)$$

Где Σ - сумма потерь тепла;

n - число элементов конструкции аппарата;

c_i - удельная теплоемкость, Дж/кг·°С;

M_i - масса, кг;

t_i^n - средняя конечная температура, °С;

t_i^k - средняя начальная температура, °С.

Как видно из формулы (23), потери на разогрев конструкции котла находятся в прямой зависимости от массы пищеварочного сосуда и греющей рубашки агрегата. Масса постаментов и блока управления при расчетах не учитываются, так как практически не нагреваются. Следовательно, уменьшение количества теплоты, затраченного на разогрев конструкции аппарата, будет равно уменьшению массы пищеварочного сосуда и греющей рубашки, а именно будет равно 30%.

Годовой экономический эффект от внесения изменений в конструкцию обогревающей рубашки определялся по формуле, описанной в работе [51]:

$$\mathcal{E} = \left[\sum_{i=1}^n \Delta C_i - E_n \cdot (K_2 - K_1) \right] \cdot A_2, \quad (24)$$

Где \mathcal{E} – годовой экономический эффект, р.;

i – эксплуатационные затраты, на которые влияет применение новой конструкции аппарата

ΔC_i – изменение затрат по i -ой статье, р/ед.;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

K_2 – удельные капитальные вложения по варианту новой техники, р.;

K_1 – удельные капитальные вложения по базовому варианту, р.;

A_2 – годовой объем производства продукции с помощью новой техники

Ввиду того, что внесение изменений в конструкцию пищеварочного сосуда и греющей рубашки дополнительных капиталовложений в производство не требует, то произведение $E_n \cdot K$ принимаем равным нулю. Результаты расчетов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Экономический эффект от изменения конструктивных параметров варочного сосуда и рубашечного теплообменника аппаратов на примере варочного котла с косвенным обогревом, объемом варочного сосуда 10 литров, выпуском 6000 единиц в год

Наименование величин, показателей	Единицы величин, показателей	Значение
1.Диаметр обечайки рубашки	мм	340
2.Диаметр варочного сосуда	мм	320
3. Толщина обечайки	мм	3
4.Изменение толщины обечайки	мм	1
5.Толщина стенки варочного сосуда	мм	2
6.Изменение толщины стенки варочного сосуда	мм	0,5
7.Снижение расхода стали AISI 321 (08X18H10T)	кг	2,33
8.Средняя цена стали AISI 321 (08X18H10T)	руб/кг	160
9.Снижение себестоимости одного котла	руб.	372,8
10.Годовой экономический эффект	тыс. руб.	2236,8

5.4 Результаты технологических испытаний

Для подтверждения работоспособности перспективных промежуточных теплоносителей на основе водных растворов пропиленгликоля в экспериментальной установке на базе рубашечного котла Groen TDB/6-10 были проведены следующие испытания:

- теплотехнические параметры аппарата отрабатывались при помощи воды, как универсального имитатора пищевых продуктов

- для установления технической возможности приготовления пищевых продуктов в процессе испытаний были получены данные по приготовлению нескольких стандартизированных по форме, процессу приготовления и составу блюд

Технологические испытания проводились над следующими объектами:

1. Первые блюда – мясокостный бульон;
2. Гарниры – каша гречневая;
3. Овощи – картофель, жаренный во фритюре;
4. Порционные блюда – жареное во фритюре куриное филе;
5. Третьи блюда – компот.

Качество готовой продукции оценивалось по следующим критериям:

- органолептические (запах, цвет, внешний вид, вкус, консистенция);
- микробиологические (содержание бактерий *Protea*, обсемененность);
- физико-химические (оценка общей ферментации и обсемененности)

Температура в центре блюда для порционных изделий – 83 °С

Для порционных блюд органолептическими критериями принимались следующие: появляющийся при прокалывании сок – светлый, кровь при прокалывании отсутствует, цвет в центре блюда при разрезе – светло-серый, корочка снаружи золотистого цвета.

Оптимальная температура в жарочной емкости при жарке во фритюре, а также степень влияния равномерного распределения температуры на качество изделия определялись при жарке картофеля во фритюре.

Картофель нарезался в соответствии с действующим сборником рецептов блюд для предприятий питания.

Жарочная емкость разбивалась на 6 кубических зон объемом 0,001 м³ каждая, в центрах которых измерялась температура. В центре каждой зоны внутри металлических садков помещались порции нарезанного стружкой картофеля. Готовность продукта определялась в соответствии с окончательной температурой в центре готового изделия [93].

Оценка органолептики проводилась при температуре изделий 65°C, которая принята для вторых блюд с гарнирами при отпуске потребителям.

Экспериментальные исследования проводились на различных мощностях при температуре фритюра (средней) 120, 135, 150, 165 и 180 °С. Каждый раз тепловая обработка проводилась в одинаковых условиях и не менее трех раз.

Также во время экспериментальных исследований были определены температура фритюра и температура внутри продукта с интервалом 180 с. Температура продукта до тепловой обработки была равна температуре окружающего воздуха.

Снижение массы продукта в результате у жарки определялась отношением массы готового продукта к массе заготовки.

Органолептические показатели оценивались по 5-бальной системе. Результаты экспериментальных исследований по жарке различных кулинарных изделий во фритюре представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2 - Результаты технологических опытов

Темп. режим, °С	t° фрит., °С	M1, г.	M2, г.	Ужарка %	τ тепл. обр., с.	A1	A2	A3	A4	A5	ΣA	A _{ср.}
185	184	150	98,5	34,3	330	3,5	4,5	4,1	3,5	3,8	34,2	3,88
170	169	149	100	32,9	380	4,6	4,9	4,6	4,8	4,5	41,8	4,68
155	155	150	98	34,7	450	4,5	4,4	4,2	4,5	4,2	39,0	4,36
140	141	148	95,5	35,5	500	4,3	4,8	4,6	4,4	4,1	40,0	4,44
125	125	150	93	38	650	1,4	4,6	2,0	3,0	3,0	35,0	2,8

Где: - M1, M2 – средняя масса изделия до и после тепловой обработки, г.;

- A1 – A5 – органолептические показатели: A1 – внешний вид; A2 – цвет на разрезе; A3 – запах; A4 – вкус; A5 – консистенция;

- ΣA – суммарная оценка, с учетом коэффициента важности показателей[51];

- A_{ср.} – средняя оценка.

Очевидно, что оптимальной является температура фритюра 170±15°С, при которой ужарка составляет 35±1 процент.

Допустимая неравномерность прогрева фритюра в жарочном сосуде составляет

$$K = \frac{\sigma - t_{cp}}{t_{cp}} = \frac{170 - 15}{170} = 0,91(25)$$

Близость коэффициента K к единице, показывает, что качество изделия высоко, а жарочная емкость используется максимально полно. Если коэффициент K < 0,90, то кулинарные изделия обрабатываются температурой неодинаково, их качество хуже и емкость используется неполно.

При варке пищевых продуктов в экспериментальном котле режимы разогрева и температурные поля близки к показателям, полученным при исследовании стандартных пищеварочных котлов, использующих в качестве промежуточного теплоносителя обычную воду. Однако, в случае использования открытой рубашки, время закипания пищевой среды увеличивается на 15-20%.

Выводы: 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 приготавливаемого продукта. Так же предложенные теплоносители позволяют использовать один аппарат с греющей рубашкой, как для жарки, так и для варки пищевого продукта.

ВЫВОДЫ

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 условии 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова Н. Д. Сравнительный анализ зависимостей для расчета теплоотдачи при кипении с недогревом [Текст] / Н.Д. Агафонова, М.А. Готовский, И.Л. Парамонова // Теплоэнергетика. – 2006. – №2. – С. 48-53.
2. Азиханов С.С. Исследование теплообмена и гидродинамики при конденсации водяного пара на вертикальной трубе в зернистом слое [Текст] / Богомолов А.Р., Петрик П.Т. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – №2. – С. 145-149.
3. Аминов М.С. Технологическое оборудование консервных и овощесушильных заводов [Текст] / М.С. Аминов, М.С. Мурадов, Э.М. Аминова. – М.: Колос, 1996. – 342 с.: ил.
4. Андреев М.М. Исследование теплоотдачи при конденсации пара, движущегося вдоль трубы при наличии поперечных составляющих скорости парового потока. Тр. Брянского института транспортного машиностроения. - 1968. – вып. 22. – С. 153-59.
5. Афанасьев Э.Э. Николаев Н.С., Рогов И. А. Аналитические методы описания технологических процессов мясной промышленности. – М.: Мир, 2003. -184 с.
6. Бабиченко Л.В. Основы технологии пищевых производств. М.: Экономика, 1969. – 202 с.
7. Балайка Б. Процессы теплообмена в аппаратах химической промышленности [Текст] / Б. Балайка, К. Сикора [пер. инж. Г.М. Гольденберга]; под. Ред. Канд. техн. наук В.А. Григорьева. – М., Машгиз, 1962. – 351с.
8. Бараненко А.В. Аналитическое решение краевой задачи теплопроводности в связи с процессом охлаждения крема кондитерского в холодильной камере [Текст] / Поляков С.В., Вороненко Б.А., Пелененко В.В. // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2008. – №2. – С. 1-5.

9. Беляев М.И. Изменение теплофизических свойств и химического состава костного бульона в процессе варки [Текст] / Черевко А.И., Запорожан Г.А. // Мясная индустрия СССР. – 1981. №5. – С. 36-37.

10. Берман Л.Д. Теплоотдача при пленочной конденсации движущегося пара на вертикальной поверхности и горизонтальной трубе. Сборник. IV Всесоюзная конференция по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов. Ч. I, Л., 1971. – С. 29-32.

11. Берман Л.Д. О критериях подобия для совместно протекающих процессов тепло- и массообмена в гетерогенных системах [Текст] / Л. Д. Берман // ЖТФ. – 1958. – т. 28. – вып. 11. – С. 35-38.

12. Бобе Л.С. К расчету конденсации пара при поперечном омывании труб парогазовой смесью [Текст] / Л.С. Бобе, Д.Д. Малышев // Теплоэнергетика. – 1971. – №12. – С. 84-86.

13. Бобе Л.С. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси при турбулентном течении внутри трубы [Текст] / Л.С. Бобе, В.А. Солоухин // Теплоэнергетика. – 1972. – №9. – С. 27-30.

14. Богданов П.Е. Основные теплофизические свойства газов и жидкостей. Номографический справочник [Текст] / Под ред. П. Е. Богданова, Кемерово, 1971. – 227 с.

15. Большев Л.А. Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости [Текст] / Кондратенко П.С., Стрижов В.Ф. // Успехи физических наук. – 2001. Т171. - №10. - С. 1051-1070.

16. Боришанский В.М. Исследование конденсации пара в элементах электрооборудования [Текст] / В.М. Боришанский и др.: Теплообмен, температурный режим и гидродинамика при генерации пара: кн. – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1981. – 234 с.

17. Боришанский В.М. Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках [Текст] / В.М. Боришанский, А.П. Козырев, А.С. Светлова. – М.: Энергия, 1974. – 214 с.
18. Бородин А. И., Иванова Е.А. Нестационарный теплообмен тел произвольной формы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. - №2. - С. 147-153.
19. Ботов М.И., Зиборов Д.М. Расчет теплотехнических характеристик растворов некоторых веществ. Труды инженерно-экономического факультета. Выпуск 7. М.: Изд-во. Россельхозакадемии, 2012. -353 с.
20. Ботов М.И. Паровой котел: секрет теплоотдачи [Текст] / А.А. Фирсов // Мясные технологии. – 2007. - №12(60). - С. 26-28.
21. Бурдун Г.Д. Основы метрологии [Текст] / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
22. Бытовые нагревательные электроприборы (контроль, расчет, испытания) / А.С. Варшавский, Л.В. Волкова, В.А. Костылев и др., М.: Энергоиздат, 1981. – 257 с.
23. Вайнберг А.М. Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач. Москва-Иерусалим. – 2009. – 210 с.
24. Ваничев А.П. Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах. [Текст] / А.П. Ваничев // Известия АН СССР, ОТН, 1946. - №12. – С. 1767-1774.
25. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М. Физматгиз, 1963. – 721 с.
26. Верхивкер Г.П., Смирнов Г.Ф., Тетельбаум С.Д. «Аналитическое определение коэффициента теплоотдачи при конденсации пара внутри труб при больших весовых нагрузках». Теплоэнергетика. – 1967. - №11. – С. 35-39
27. Витман Л.А. Исследование плотности орошения распыленной струи жидкости. Сб. научных работ ЛСХИ, т. XI, 1955. – 345 с.

28. Волков М. Л. Методы расчета тепловых аппаратов предприятий общественного питания [Текст] / М.Л. Волков. – М., Экономика, 1986. – 213 с.
29. Вороненко Б.А. Математическое описание процессов тепло- и массопереноса в колбасных изделиях при их тепловой обработке [Текст] / Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Стариков В.В. // процессы и аппараты пищевых производств. – 2008. – №2. – С. 27-30.
30. Воскресенский К.Д. Расчет теплообмена при пленочной конденсации с учетом зависимости физических свойств конденсата от температуры [Текст] / К.Д. Воскресенский // Изв. АН СССР, ОТН, 1948. - №7. – С. 1023-1028.
31. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд-во. Стандартов. 1969. - 155 с.
32. Вышелесский А.Н. Тепловое оборудование предприятий общественного питания [Текст] / А.Н. Вышелесский. – изд. 5-е, перераб. и доп. – М., Экономика, 1976. – 399 с., ил.
33. Вышелесский А.Н. Исследование теплообмена в парогенераторах пищеварочных котлов [Текст] / А.Н. Вышелесский, В.А. Дорохин, Д.Ф. Фатыхов // Оборудование предприятий торговли и общественного питания: сб. науч. Тр. – МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1974. – вып. 2. – С. 168-174.
34. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / Н.И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – 384 с. – С. 22-23.
35. Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков. Сб. научных трудов Сиб. отд. АН СССР, Ин-т. Теплофизики / Под ред. И.Р. Шрейбера. Новосибирск, ИТФ, 1983. – 356 с.
36. Гинзбург А., Громов М., Красовская Г. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. Издание 2-е, дополненное и переработанное. - М.: Изд-во Пищевая промышленность. – 1980. – 288 с.
37. Глаголев К.В., Окилов Х.А. Тепловое оборудование предприятий общественного питания. Экспресс-информация Центросоюза ЦБТЭИ

потребительской кооперации; серия «Техника для кооперативных предприятий. – М., Центросоюза ЦБТЭИ, - №4. – 1982. – С. 234-238.

38. Голубева Л.В. Современные технологии и оборудование для производства молока [Текст] / Л.В. Голубева, А.Н. Пономарев. – М.: ДеЛи Принт, 2004. – 179 с.

39. Гонин И.И. Методические ошибки в экспериментальных исследованиях теплообмена при кипении в условиях свободной конвекции // Теплофизика высоких температур. 2008, Т. 46. - №3. – С. 347-380.

40. Гордон Л.И., Ботов М.И. Отчет о НИР «Совершенствование узлов панельных пищеварочных котлов». - М., МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1982. № Госрегистрации 01820071012. – 65 с.

41. Гордон Л.И. Панельное оборудование предприятий общественного питания. –М.: Экономика, 1982. – 352 с.

42. Гордон Л.И. К вопросу о теплоотдаче при конденсации чистого насыщенного пара в кольцевых щелевых каналах [Текст] / Л.И. Гордон, В.Я. Груданов // Оборудование предприятий общественного питания: сб. науч. Тр. – МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1976. – вып. 3. – С. 9-19.

43. Гордон Л.И., Королева Н.Г., «Опыт применения высокотемпературных теплоносителей в тепловых аппаратах предприятий общественного питания» Сборник научных работ №3, ЦКБТМ, Госторгиздат, 1959. – 456с.

44. Гордон Л.И. Термодинамические основы и теплообменные характеристики процессов и рабочих тел для тепловой аппаратуры с косвенным обогревом. Изд.-во МИХН им. Г.В. Плеханова, 1971. – 382 с.

45. Гордон Л.И. Пищеварочные котлы: пути модернизации [Текст] / Л.И. Гордон // Общественное питание. – 1980. - №3. – С. 46-49.

46. ГОСТ СТ СЭВ 3318-81. Котлы пищеварочные электрические для предприятий общественного питания. Технические требования и методы испытаний [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.: ил.

47. Груданов В.Я. Исследование процессов в греющих полостях пищеварочных котлов и обоснование их параметров. Диссертация ... канд. техн. наук. – МИНХ им Г.В. Плеханова, 1973. – 150 с.
48. Дуббель Г. Справочная книга по теплотехнике. т. 1. Одесса. Изд-во. «Светоч», 1982. – 236 с.
49. Ермолаев И.А., Отпущенников С.В. Влияние тепловых граничных условий на локальные особенности естественной конвекции малой интенсивности в квадратной области // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. - №6. - С. 914-920.
50. Зиборов. Д.М. Совершенствование мобильных предприятий питания. Статья. Журнал «Наука и бизнес: пути развития». – 2014. – № 9. – С. 34-39.
51. Зиборов Д.М. Экономический эффект от совершенствования мобильных предприятий питания. Статья. Журнал «Вестник РЭУ». – 2014. - №9. – С. 35-39.
52. Зиборов Д.М. Обоснование методики расчета теплотехнических характеристик перспективных универсальных теплоносителей. Статья. Журнал Наука и бизнес: пути развития». – 2014. - №10. – С. 38-42.
53. Зозуля Н.В. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при конденсации пара вязкого вещества [Текст] / Н.В. Зозуля // Теплопередача и тепловое моделирование: кн. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 286 с.
54. Инженерные методы решения задач теплопроводности [Текст] / В.С. Зарубин. – М.: Энергоатомиздат., 1983. – 328 с. : ил.
55. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации [Текст] / В.П. Исаченко. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
56. Казанцев И.А. и др. Методические рекомендации по оценке теплозащитных качеств ограждающих конструкций и микроклимата мобильных зданий». Л., 1979. – 152 с.

57. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. Изд-во «Наука», 1970. – 262 с.
58. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А. Н. Касаткин. – Изд. 9-е, испр. – М., «Химия», 1973. – 750 с. с ил.
59. Коган П.Я. Исследование и обоснование параметров жарочных аппаратов с однофазным промежуточным теплоносителем для предприятий общественного питания [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Коган Павел Яковлевич. – М., 1975. – 24 с.
60. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим [Текст] / Г.М. Кондратьев. – М., Гостехиздат, 1954. – 408 с.
61. Кочкин Н.Е. Теоретическая гидромеханика. М., Физматгиз, 1963. – 245 с.
62. Кошкин В.К. Нестационарный теплообмен [Текст] / В.К. Кошкин, Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер. – М., «Машиностроение», 1973. – 328 с.
63. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1983. – 512 с., ил.
64. Кружилин Г.Н. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции [Текст] / Г. Н. Кружилин // Изв. АН СССР, ОТН, 1949. - №5. – С. 701-712.
65. Крюков А.П. Конденсация из парогазовой смеси [Текст] / Левашов В.Ю., Павлюкевич Н.В. // Инженерно-физический журнал. – 2010. Т. 83. - №4. – С. 637-644.
66. Кулиниченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам [Текст] / В.Р. Кулиниченко. – К.: Техника, 1990. – 165 с.
67. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1970. – 649 с.
68. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: справочное пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

69. Лабунцов Д.А. Обобщение теории Нуссельта на условие пространственно-неравномерного поля температур теплообменной поверхности [Текст] / Д.А. Лабунцов // Теплообмен и гидродинамическое сопротивление: кн. / Тр. МЭИ, 1965. – вып. 63. – С. 79-84.

70. Лабунцов Д.А. Теплопередача при пленочной конденсации чистых паров на вертикальных поверхностях и горизонтальных трубах [Текст] / Д.А. Лабунцов // Теплоэнергетика, 1957. - №7. – С. 72-79.

71. Лапицкий А.Г. Теплообмен излучением [Текст] / Кунгс Я.А., Курмачев Ю.Ф., Цугленок Н.В. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2007. - №1. – С. 254-261.

72. Лившиц Б.Л., Фогель В. О. «Новый высокотемпературный теплоноситель жидкий дитолилметан». Промышленная энергетика. - 1961. - №8. – С. 56-59.

73. Липатов Н.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. М., Экономика, 1987. – 272 с.

74. Литвина Л.С. Тепловое оборудование предприятий общественного питания [Текст] / Л.С. Литвина, З.С. Фролова. – М., «Экономика», 1969. – 311 с.

75. Лобанов Д.И. Технология производства продуктов общественного питания. Изд-во «Экономика», 1967. – 258 с.

76. Ловачева Г.Н., Лихачева А., Петрова В. «Варка в электродуховках». Общественное питание. – 1958. - №11. – С. 32-41.

77. Лунин О.Г. Теплообменные аппараты пищевой промышленности [Текст] / О.Г. Лунин. – М., 1968. – 216 с.

78. Лыков А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, Энергия, 1974. – 599 с.

79. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача. Metallurgizdat, 1961. – 382 с.

80. Мартыненко О.Г. Соковишин Ю.А. Свободно–конвективный теплообмен [Текст]: справочник / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – М.: Наука и техника, 1982. – 400 с., ил.

81. Мильман О.О. Конденсация пара в параллельных каналах воздушно-конденсационной установки [Текст] / Петров П.П., Помазков В.В. // Вестник Калужского университета. – 2008. - №4. - С. 15-20.

82. Минухин Л.А. Тепловые процессы и тепловое варочное оборудование [Текст] / Л.А. Минухин. – Свердловск: СИНХ, УрГУ, 1984. – 85 с.

83. Минухин Л.А. Влияние неоднородности среды на тепло- и массообмен при конденсации пара, содержащего примесь неконденсирующегося газа [Текст] / Л.А. Минухин. Известия вузов. Пищевая технология, 1985. - №5. – С. 89-92.

84. Минухин Л.А. Расчеты сложных тепло- и массообмена в аппаратах пищевой промышленности [Текст] / Л.А. Минухин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 174 с.

85. Михеев М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М., 1977. – 240 с.

86. Натепров В.И. Исследование газовых пищеварочных котлов с непосредственным обогревом [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. / Натепров Владимир Иванович. – М., 1969. – 24 с.

87. Некрутман С.В. и др. Справочник механика предприятий общественного питания. М., Экономика, 1978. -222 с.

88. Новые виды электрического оборудования [Текст] / О.А. Петрушина. – Техника предприятий общественного питания: экспресс-информация. – М.: ЦНИИТЭИ торговли, 1981. – вып. 3. -12 с.

89. Номенклатурный каталог «Оборудование для предприятий торговли и общественного питания, серийно выпускаемое в 1986 г.» М., ЦНИИТЭИ Лепищемаш, 1986. – 45 с.

90. Оборудование предприятий общественного питания. / Справочник. М., Экономика, 1979. – 352 с.

91. Обратные задачи теплообмена. / О.М. Алифанов. – М. Машиностроение, 1988. – 280 с.

92. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена [Текст]: учеб. Пособие для вузов / В.А. Осипова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с., ил.

93. Осколков С.К. Повышение эффективности автономных жидкотопливных горелочных устройств для передвижных предприятий питания : Дис... канд. техн. наук : 05.18.12 / С. К. Осколков, Рос. экон. акад. им. Г. В. Плеханова. – М., 2009. – 131с..

94. Пат. 2228132 Российской Федерации А47J27/06. Варочный котел [Текст] / Стребков Д.С., Шувалов А.М., Козлов А.И., Якунин Д.В., Кочергин С.В.; заявитель и патентообладатель Государственное науч. учр. Всероссийский науч.-исслед. ин-т электрификации сельского хозяйства. - № 2003115726/12; заявл. 28.05.2003; опубл. 05.10.2004, Бюл. № 03. – 2 с.

95. Пат. 2023411 Российской Федерации А47J27/14. Пищеварочный котел [Текст] / Л.А. Минухин, В.И. Лёгкий; заявитель и патентообладатель Уральский ин-т народного хоз-ва. - № 4947513/13; заявл. 18.06.1991; опубл. 30.11.1994, Бюл. № 30. – 4 с.

96. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

97. Перри, Джон Г. Справочник инженера-химика / пер. с англ. Л., Химия, 1969, т. 2. - 504 с.

98. Положенцев Г.Н. Исследование и обоснование технологических и теплообменных характеристик фритюрниц непрерывного действия с вакуумированной жарочной ванной [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Положенцев Герман Николаевич. – М., 1973. – 29 с.

99. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приоры [Текст] / В.П. Преображенский. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

100. Рачко В.А. Влияние содержания воздуха на теплоотдачу при конденсации пара [Текст] / В.А. Рачко // Энергомашиностроение, 1965. - №8. – С. 17-20.

101. Рекомендации по теплотехническому расчету мобильных (сборно-разборных и передвижных) домов для крайнего севера. Л., Стройиздат, 1977. – 65 с.
102. Решетников И. Ф. Процессы в греющих полостях и рабочих объемах пищеварочных котлов [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Решетников Игорь Филиппович. – МИНХ им Г.В. Плеханова, 1983. – 23 с.
103. Ривкин С. Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с., ил.
104. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. / Пер. с англ. Л., Химия, 1969, т. 1. – 592 с.
105. Савицкий В.В. Поверхностные электронагревательные на основе органосиликатных материалов [Текст] / В.В. Савицкий // Питание и общество. – 1994. - №10. – С. 29-32.
106. Самарский А.А., Вабищев П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
107. Сергеев О.А. Метрологические основы теплотехнических измерений [Текст] / О.А. Сергеев. – М., Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
108. Современное оборудование для предприятий общественного питания. Обзор. М., ЦБТЭИ, 1973. – 10 с.
109. Солдаткин М.Т., Кравец В.Ф. Теплообмен при конденсации пара из парогазовой смеси. Изв. выс. учебн. заведений. - М.: Энергетика, 1971. - №8. – С. 130-133.
110. Срагович Д.С. Исследование процессов в греющих рубашках варочной и жарочной аппаратуры. Диссертация ... канд. техн. наук. – МИНХ им Г.В. Плеханова, 1968. – 158 с.
111. Температурные измерения [Текст]: справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина [и др.]; Отв. ред. Геращенко О.А.; АН УССР. Ин-т проблем энергосбережения. – Киев: Наук. д умка, 1989. – 704 с.

112. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст]: Справочник под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
113. Теория теплообмена [Текст] / А.И. Леонтьев; под общ. ред. А.И. Леонтьева. – М., 1979. – 495 с.
114. Теория теплообмена [Текст]: учебник для вузов / И.С. Исаев, И.А. Кожин [и др.]; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.
115. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент [Текст] / Е.Б. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев [и др.]; под. Общ. Ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.
116. Теплопередача [Текст]: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с., ил.
117. Теплотехнический справочник [Текст] / под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, т. 1, 1975. – 743 с.
118. Теплотехнический справочник [Текст] / под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – В 2-х т., т. 2 – 2-е изд. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
119. Теплофизические свойства газов, растворителей и растворов солей. Справочник/ Е.М. Шадрина [и др.], Иван. гос. хим.-технол. ун.-т. – Иваново, 2005. - 196 с.
120. Термодинамические свойства и свойства переноса газов, жидкостей и твердых тел. / Сб. статей под ред. И.Н. Нигматулина. – Л.: Энергия, 1964. - С. 168-172.
121. Технология продукции общественного питания. В 2-х томах / Ратушный А.С., Хлебников В.И., Баранов Б.А., Жубрева Т.В., и др.; под. ред. проф. А.С. Ратушного. – М. : Мир, 2004 (Учебники и учеб. пособия для студентов высших учебных заведений). Т. 1. – С. 141-213; Т 2 – С. 47-93.

122. Толубинский В.И., Ямпольский Н.Г. Теплоотдача при конденсации водяного пара (чистого и с примесью воздуха) на поверхности вертикальной трубы [Текст] / В.И. Толубинский, Н.Г. Ямпольский. – Тр. Ин-та теплоэнергетики УССР, 1953. – вып. 10. – С. 24-31.

123. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров [Текст]: справочник / Х. Уонг. – М., 1979. – 216 с.

124. Филатова Е. Ю. Расчет теплообменника для парциальной конденсации многокомпонентной смеси [Текст] / Туголуков Е.Н., Ведищева О.В. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные науки и технические науки. – 2006. - №3. – С. 310-313.

125. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. – 504 с.

126. Фрост А.В. Физико-химические свойства углеводородов. Вып. I и II. –М.: Гостоптех-издат, 1947. – 217 с.

127. Харламов С.В. Практикум по расчету и конструированию машин и аппаратов пищевых производств [Текст] / С.В. Харламов. – Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 256 с., ил.

128. Хохлов Р. Тест-драйв: пищеварочные котлы [Текст] / Р. Хохлов // Ресторанные ведомости, 2005. – №6. – С. 70-73.

129. Холин Б. Г. [и др.]. Труды ГИАП процессы и аппараты. Вып I и II. М., 1969. – 267 с.

130. Черенков А. И. Исследование некоторых теплофизических характеристик пищевых продуктов и новых промежуточных теплоносителей для тепловых аппаратов предприятий общественного питания [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., МИНХ им. Г. В. Плеханова, 1964. – 17 с.

131. Чечеткин А. В. Высокотемпературные теплоносители. - М.: Изд-во «Энергия», 1971. – 496 с.

132. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / С.Ф. чистяков, Д.В. Радун. – М., «Высшая школа», 1972. – 392 с., ил.

133. Шавра В.М., Розенфельд Т.С., Глаголев К.В. Создание средств питания в полевых условиях. Отчет о НИР № 11-75, ВНИИ Торгмаш, М., 1975. – 86 с.

134. Шак А. Промышленная теплопередача [Текст] / А. Шак. - М.: Гос. научно-техническое изд-во литер. по черной и цветной металлургии, 1961. – 513 с.

135. Шарков А.В. Установка для исследования свободно-конвективного теплообмена [Текст] / Кораблев В.А., Васильева Е.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. Т. 48. - №1. – С. 61-64.

136. Шихалев С.В. Совершенствование конструкций пищеварочных котлов на основе моделирования процессов разогрева жидких пищевых сред [Текст]: С.В. Шихалев, Диссертация ... канд. техн. наук. – РЭУ им Г.В. Плеханова, 2011. – 164 с.

137. Эккерт Э. Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена / [пер с англ.] – М.: Госэнергоиздат, 1981. – 680 с.

138. Эстерман А.И., Курбатова И.М. Исследование физико-химических свойств новых органических теплоносителей. Сборник науч. работ №2 ЦКБТМ, М., Госторгиздат, 1958. – 486 с.

139. Ярин Г.А. Экономика фирмы: инновации и инвестиции, прибыль и оплата труда, инновационно-инвестиционная стратегия, оценка финансовой устойчивости [Текст]: учебник / Г.А. Ярин; Федер. агентство по образованию, Урал. гос. экон. ун-т. 2-е изд., доп. и испр. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2010. – 450 с.

140. ASHRAE Handbook – HVAC Applications. SI Edition. Ch. 48. Atlanta, 2003. – P. 121.

141. Davis E. J., Anderson G.H. The incipience of nucleate boiling in forced convection flow. AICHE J., #12, 1966. - P. 774-780.

142. Frank P. Incropera. David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 6th Edition. – Wiley. – 2006. – 1024 p.
143. Goldstein R.J. Briggs D.G. J. Heat Transfer, 86, 1964. – 256 p.
144. Hetsroni, G.(ed). Handbook of multiphase systems. Mc Graw-Hill, New York, 1982. – 324 p.
145. Handbook of Food Engineering Practice edited by Kenneth J. Valentas, Enrique Rotstein, R. Paul Singh, CRC Press LLC, 1998. – 168 p.
146. Huebner K.N., A Finite Element Method for Engineers, Wiley, NY., 1975. – 232 p.
147. Myers G.E./ Analytical Methods in Conduction Heat Transfers, McGraw, N.Y., 1971. – 192 p.
148. Schetz J.A., Eichorn R.J. Heat Transfer, 84, 1962. – 268 p.
149. Smith S.L. Void fraction i two-phase flow: a correlation, based upon an equal velocity heat motel. Heat auf Fluid Flow. - 1971. - №1. – P. 26-29.
150. Thomas D.S. Enhancement of film consideration heat transfer rates on vertical tubes by vertical wires. – Ind. Eng. Chem., 1967. - № 6. – P. 36-39.
151. Thome J.R., Shock R.A.W. Boiling of multicomponent liquid mixtures. Advances in Heat Transfer. 16, 1984. - P. 59-156.
152. Van Der Waly J. and Krogen D.G. Heat transfer during film condensation of saturated and superheated Freon-12. – Heat Mass Transfer, 1972, vol. 6. - P. 75-98.
153. Wallis G.B. One-dimensional two-phase flow. Mc Graw-Hill, New York, 1969. – 396 p.
154. Whalley, P.B. Boiling, Condensation auf Gas-liquid Flow. Oxford, Clarendon Press, 1987. – 268 p.
155. Zuber N., Staub F.W., Bijwaard G., Kroeger P.G. Steady-state and transient void fraction in two-phase flow systems. General Electric Report, GEAP-5417, 1967. – 458 p.

156. Zuber N. On the Disperced Flow in the Laminar Flow Regime, Chem. Eng. Sci. - 1964. - № 19. – P. 897-917.

157. Zwick S.A., Plesset M.S. On the Dynamics of Small Vapor Bubbles in Liquids, J. Math. Phys. – 1955. - №33. – P. 308-330.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Определение погрешностей измерения

А1 Случайная погрешность

Величина случайной погрешности E_x , %, а также измерений температуры жидкости в пищеварочном сосуде, температуры в пространстве рубашки, температуру стенки пищеварочного сосуда, и линейных размеров котла определялись по формуле

$$E_x = \frac{\sigma_{кв}}{\bar{x}} \bullet 100\% ,$$

Где $\sigma_{кв}$ - среднее квадратичное отклонение параметра x от истинного значения;
 \bar{x} - среднее арифметическое опытных значений параметра x .

Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{кв}$ находили по формуле

$$\sigma_{кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} ,$$

где x_i – значение измеряемого параметра в отдельном опыте;
 n – количество опытов.

А2 Систематическая погрешность

Систематическая погрешность $\Delta_{\text{сист}}$ возникающая при измерении температуры рабочей жидкости в пищеварочном сосуде, температуры в пространстве рубашки, температуру стенки пищеварочного сосуда, а также линейных размеров котла, принимались равными основной погрешности, смотри таблицу А1.

Таблица А1 – Абсолютная погрешность прямых измерений в опытах по разогреву котла Groen TDB/6-10

	Измеряемый параметр				
	Температура жидкости в варочном сосуде $t_{\text{ж}}, ^\circ\text{C}$	Температура в рубашечном пространстве $t_{\text{см}}, ^\circ\text{C}$	Температура стенки варочного сосуда $T_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	Диаметр варочного сосуда $D, \text{ м}$	Давление в рубашечном пространстве $P, \text{ бар}$
Прибор	КСП-4	КСП-4	КСП-4	Штанген-циркуль	Манометр
Класс точности	0,25	0,25	0,25		1,0
Предел измерений	0÷200	0÷200	0÷200	10^{-4}	-1,5÷5,0
Погрешность прибора $\Delta_{\text{сист}}$	0,49	0,49	0,49	10^{-4}	0,1

Относительную погрешность косвенных измерений вычисляли по правилу дифференцирования натурального логарифма, смотри таблицу А2.

Таблица А2 – Систематическая погрешность при косвенных измерениях в опытах по разогреву котла Groen TDB/6-10

Наименование величины, обозначение	Расчетная формула для определения величины	Формула для определения погрешности величины	Значение, %
1	2	3	4
Разность температур в рубашке и жидкости в варочном сосуде, $t_{см} - t_{ж}$		$\delta(t_{см} - t_{ж}) = \frac{\Delta t_{см} + \Delta t_{жс}}{t_{см} - t_{жс}} \cdot 100\% ,$ <p>Где $\Delta t_{см}$, $\Delta t_{жс}$ – соответственно абсолютная погрешность при прямом измерении температуры в рубашке и жидкости в варочном сосуде</p>	6,7
Коэффициент теплопередачи, k	$k = \frac{q}{t_{см} - t_{жс}}$	$\Delta k = \delta q + \delta(t_{см} - t_{жс})$	12,4
Поверхностная плотность теплового потока, q	$q = \frac{Q_{пол}}{F \cdot \tau}$	$\delta q = \delta Q + \delta F$	5,7
Количество тепла, Q	$Q = m \cdot c (t_{ж,i+1} - t_{ж,j})$	$\delta Q = \delta m + \delta c + \delta(t_{ж,i+1} - t_{ж,j})$	5,4

1	2	3	4
Масса жидкости, m	$m = \rho \cdot V$	$\Delta m = \delta \rho + \delta V$	0,4
Объем варочного сосуда, V	$V = \frac{\pi D^3}{12} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$	$\delta V = \left(\frac{\pi D^3}{12} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h \right) \cdot \frac{\Delta D}{V} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\Delta h}{V} \cdot 100$	0,4
Разность температур жидкости на временном интервале τ , $t_{ж,i+1} - t_{ж,i}$		$\delta(t_{ж,i+1} - t_{ж,i}) = \frac{\Delta t_{ж,i+1} + t_{ж,i}}{t_{ж,i+1} - t_{ж,i}} \cdot 100\%$	5
Площадь теплопередающей поверхности, F	$F = \frac{\pi \cdot D^2}{2} + \pi \cdot D \cdot h$	$\delta F = \frac{\pi \cdot (D + h) \cdot \Delta D + \pi \cdot D \cdot \Delta h}{F} \cdot 100\%$	0,3
Коэффициент теплоотдачи от стенки варочного сосуда к жидкости, $\alpha_{ж}$	$\alpha_{ж} = \frac{q}{t_{ст} - t_{ж}}$	$\Delta \alpha = \delta q + \delta(t_{ст} - t_{ж})$	14,9

1	2	3	4
Разность температур в рубашке и жидкости в варочном сосуде, $t_{ст} - t_{ж}$		$\delta(t_{ст} - t_{ж}) = \frac{\Delta t_{ст} + \Delta t_{ж}}{t_{ст} - t_{ж}} \cdot 100\% ,$ <p>Где $\Delta t_{ст}$ – абсолютная погрешность при прямом измерении температуры стенки варочного сосуда, °С</p>	9,3

Таблица Б5 – Режим разогрева экспериментального котла при залитом в рубашке теплоносителе 48% водный раствор пропиленгликоля, мощность разогрева максимальная, рабочая среда-вода

Положение ручки регулировки мощности	Время, мин.	Температура на термомпарах №№ 1-10, °С									
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
6	0,68	42	34	27	26	26	26	29	29	34	59
6	3,08	71	64	36	37	30	35	64	63	65	82
6	5,42	79	79	53	60	50	50	87	94	94	94
6	7,83	86	87	72	86	69	65	98	99	99	100
6	10,17	94	96	94	97	83	80	105	106	106	108
6	12,58	105	106	106	105	93	94	113	114	114	115
6	15,08	105	106	106	105	100	100	113	113	113	114
6	17,42	106	107	107	105	100	100	113	113	113	114
6	19,83	106	107	107	105	100	100	112	113	113	114
6	22,25	106	107	107	105	100	100	112	113	112	114
6	24,67	106	107	107	105	100	100	112	113	112	114
6	27,08	106	107	108	106	100	100	112	113	112	114
6	29,42	106	107	107	105	100	100	112	112	112	114

Таблица Б10 – Режим разогрева экспериментального котла при залитом в рубашке теплоносителя 80% водный раствор пропиленгликоля, мощность разогрева максимальная, рабочая среда-вода, давление в рубашке атмосферное

Положение ручки регулировки мощности	Время, мин.	Температура на термомпарах №№ 1-10, °С									
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
6	0,5	31	32	28	25	24	25	25	25	35	52
6	2,92	54	45	43	28	25	28	41	37	75	91
6	5,25	66	63	59	41	33	35	74	65	94	104
6	7,67	80	74	68	50	43	49	81	71	100	110
6	10,08	87	87	80	65	56	64	86	84	108	112
6	12,42	96	97	94	86	75	79	102	101	114	115
6	14,92	104	104	103	98	88	91	108	104	116	117
6	17,25	106	106	107	100	94	98	108	106	118	119
6	19,67	106	106	106	100	99	100	107	104	118	122
6	22,08	106	107	106	100	99	100	108	103	119	126
6	24,42	105	106	106	100	99	100	108	103	121	130

