

На правах рукописи



Папченков Анатолий Игоревич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОСИФОНОВ
КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мунц Владимир Александрович

Официальные оппоненты: **Майданик Юрий Фольевич**,
доктор технических наук, ФГБУН Институт
теплофизики Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург, заведующий
лабораторией теплопередающих устройств;

Кузнецов Гений Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», главный
научный сотрудник Научно-образовательного
центра И. Н. Бутакова

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное
объединение по исследованию и проектированию
энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»
(ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «21» декабря 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=285906>

Автореферат разослан «__» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Для утилизации теплоты отходящих газов во многих технологических процессах используются котлы-утилизаторы с термосифонами, исследованию которых посвящена настоящая работа. Термосифоны являются перспективными теплопередающими элементами в различных системах, требующих повышенной надёжности. Обладая простотой конструкции, автономностью и наличием двойного теплопроводного барьера между нагреваемым и охлаждаемым теплоносителем, они позволяют существенно повысить надёжность и безопасность работы теплоутилизационных установок, включающих термосифоны в качестве поверхностей нагрева. Термосифоны обладают малым термическим сопротивлением, просты и автономны в работе и не требуют дополнительных затрат энергии на перекачку теплоносителя.

Исследования тепловых труб и термосифонов выполняются в ведущих научных центрах ближнего и дальнего зарубежья. Широко известны работы М. Гроля (Германия), представителей уральской научной школы Ю. Ф. Майданика и В. М. Кисеева, Л. Л. Васильева (Беларусь), Б. В. Балунова, Г. В. Кузнецова, М. Б. Х. Мантелли (Бразилия), М. К. Безродного (Украина), И. Л. Пиоро (Канада).

В настоящее время на девяти предприятиях России и Казахстана эксплуатируются котлы-утилизаторы с термосифонами, разработанные ОАО «Уралэнергоцветмет». В условиях эксплуатации, подвергаясь различным производственным факторам (превышение температуры отходящих газов относительно проектных значений, выгорание серы на поверхности нагрева, воздействие систем очистки поверхностей от пылевых отложений и др.), термосифоны разрушаются и выходят из строя, что снижает общий КПД котла-утилизатора, повышает температуру и запыленность отходящих газов.

Цель работы заключается в повышении тепловой эффективности термосифонов при утилизации тепловых отходов ВЭР и эксплуатационной надёжности работы термосифонов котлов-утилизаторов на протяжении всей кампании металлургической печи (источника ВЭР). Отсюда можно сформулировать **основные задачи исследования:**

- постановка и реализация промышленных экспериментов с обеспечением комплекса измерений требуемых параметров термосифонов при различных режимах работы котла-утилизатора;
- адаптация алгоритмов теплового расчета применительно к термосифонам и последующая их верификация с данными, полученными при проведении промышленных экспериментов;
- разработка модели и получение расчетных характеристик (постоянные времени и коэффициент усиления) термосифона как объекта регулирования;
- разработка мероприятий по повышению энергетической эффективности работы термосифонов и рекомендаций по их безаварийной эксплуатации.

Методология и методы исследования:

- эксперименты проведены в условиях действующей промышленной установки на блоке из 42 термосифонов натуральных конструкции и размеров, при натуральных параметрах пароводяной смеси и параметров нагрузки теплоутилизационной установки;
- разработаны и сконструированы измерительные системы, фиксирующие с требуемой точностью количественные характеристики рассматриваемых процессов. Разработанные алгоритмы и порядок проведения исследований базируются на современных достижениях в области теплообмена, массообмена и гидродинамики;
- в эксперименте использованы современные средства измерения и регистрации измеряемых параметров.

Автор защищает:

1. Экспериментальные данные, полученные в процессе проведения промышленных экспериментов по охлаждению отходящих высокотемпературных газов медеплавильной печи и утилизации их тепла с помощью замкнутых двухфазных теплопередающих устройств (термосифонов), отражающие изменения теплотехнических характеристик системы в связи с накоплением пылевых отложений, налипающих на поверхности испарителей термосифонов.

2. Результаты вычисления теплопередающих характеристик двухфазного термосифона.

3. Модель расчета переходных процессов с полученными характеристиками термосифона как объекта регулирования при ступенчатом возмущении изменением температуры газов.

4. Наилучшие технические решения, обобщенные из опыта проектирования в эксплуатации теплоутилизационных установок с термосифонами.

5. Порядок заполнения двухфазных термосифонов рабочей жидкостью, включающий ее дозированное заполнение, дегазацию внутренней полости путем вакуумирования и герметизацию объема с помощью двойного сварного шва и проверку на герметичность.

Научная новизна работы и теоретическая значимость:

– Впервые измерены фактические параметры работы термосифонов в котле-утилизаторе конструкции ОАО «Уралэнергоцветмет» за отражательной печью.

– Получена совокупность установленных в результате работы технических и конструкторских решений, связанных с повышением надёжности работы термосифонов.

– Предложена модель переходных процессов в термосифоне с расчетом постоянной времени и коэффициента усиления термосифона как объекта регулирования при ступенчатом возмущении изменением температуры газов.

– Предложен новый порядок заполнения и герметизации термосифонов разработки ОАО «Уралэнергоцветмет с внесением изменений в их конструкцию.

Практическая ценность и реализация результатов работы состоит в том, что полученные зависимости и расчетные характеристики были использованы ОАО «Уралмеханобр» в проектных проработках котлов-утилизаторов за печью «Ausmelt» ОАО «Святогор» и за печами Ванюкова ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод». Результаты проведенных НИОКР подтверждаются актом оценки и использования результатов внедрения НИОКР.

Достоверность научных положений и выводов по работе основывается на следующем:

- в исследованиях использованы современные средства измерения, методы исследования и обработки опытных данных;
- при проведении экспериментальных измерений применены апробированные методики и метрологически поверенные приборы;
- проведена статистическая обработка результатов измерений и проверка результатов теоретического и экспериментального исследования.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов, выполненных автором и при его непосредственном участии. При этом автор самостоятельно разработал систему измерений параметров работы термосифонов в промышленных условиях, организовал проведение экспериментов с помощью систем измерения, разработал вспомогательные устройства для измерения параметров (в т.ч. термозащитный чехол для термопары с отсосом газа с помощью эжектора, устройство для измерения теплового потока, устройство для измерения температуры по высоте полости термосифона и др.). Автором подготовлены публикации, патенты на полезную модель и отчеты по выполненной работе.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Екатеринбург, 18–21 декабря 2012 г.); Девятнадцатой Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Орехово-Зуево, Московская область, 20–24 мая 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса (г. Верхняя Пышма, 3–4 сентября 2013 г.); VIII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники» (г. Киев, 8–11 октября

2013 г.); VIII Всероссийском семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике (г. Екатеринбург, 12–14 ноября 2013 г.); VIII ежегодной Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования – 2013» (г. Москва, 11–13 декабря 2013 г.); VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ 2017) с международным участием (г. Екатеринбург, 11–12 мая 2017 г.).

Публикации. Результаты диссертации изложены в 19 печатных работах, основные из которых [1-3, 6-12], включая 3 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК при Минобрнауки РФ и 1 коллективную монографию [6]. По теме исследования получено 2 патента РФ на полезную модель [4-5].

Структура и объём работы. Диссертация содержит 146 страниц основного текста (введение, 5 глав с выводами, заключение по работе), 56 рисунков, 20 таблиц, 5 приложений на 16 страницах. Список литературных источников содержит 103 наименования (включая труды автора). Общий объём диссертации составляет 178 страниц.

ОСНОВАННОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены устройство, конструкция, принцип действия термосифона. Приведено описание котлов-утилизаторов с термосифонами, примеры их компоновки, основные принципы работы, условия эксплуатации и характеристики материалов составных частей. Представлена сводная информация о действующих теплоутилизационных установках с термосифонами. Проведен аналитический обзор литературных источников, посвященных принципам теплового расчета при кипении и конденсации, а также влиянию неконденсирующихся газов на теплообмен при конденсации. Отмечено, что в имеющихся моделях расчета двухфазных термосифонов не учитываются

термическое сопротивление пылевидных отложений, которые в условиях эксплуатации объекта, исследуемого в диссертационной работе, необходимо принимать во внимание. В результате проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведена характеристика объекта исследования и методика проведения экспериментов, проведенных на медеплавильном комбинате ОАО «Святогор» (г. Красноуральск) на установке для утилизации теплоты отходящих газов за отражательной печью № 2. Шихта загружается в отражательную печь, внутри которой поддерживается температура ~ 1500 °С. Для снижения потерь теплоты с уходящими газами за отражательной печью установлен котел-утилизатор, в конвективном газоходе которого установлено 4 блока термосифонов (2 из которых состоят из 10 ед. термосифонов, 2 – из 11 ед.). Схема термосифона представлена на рисунке 1.

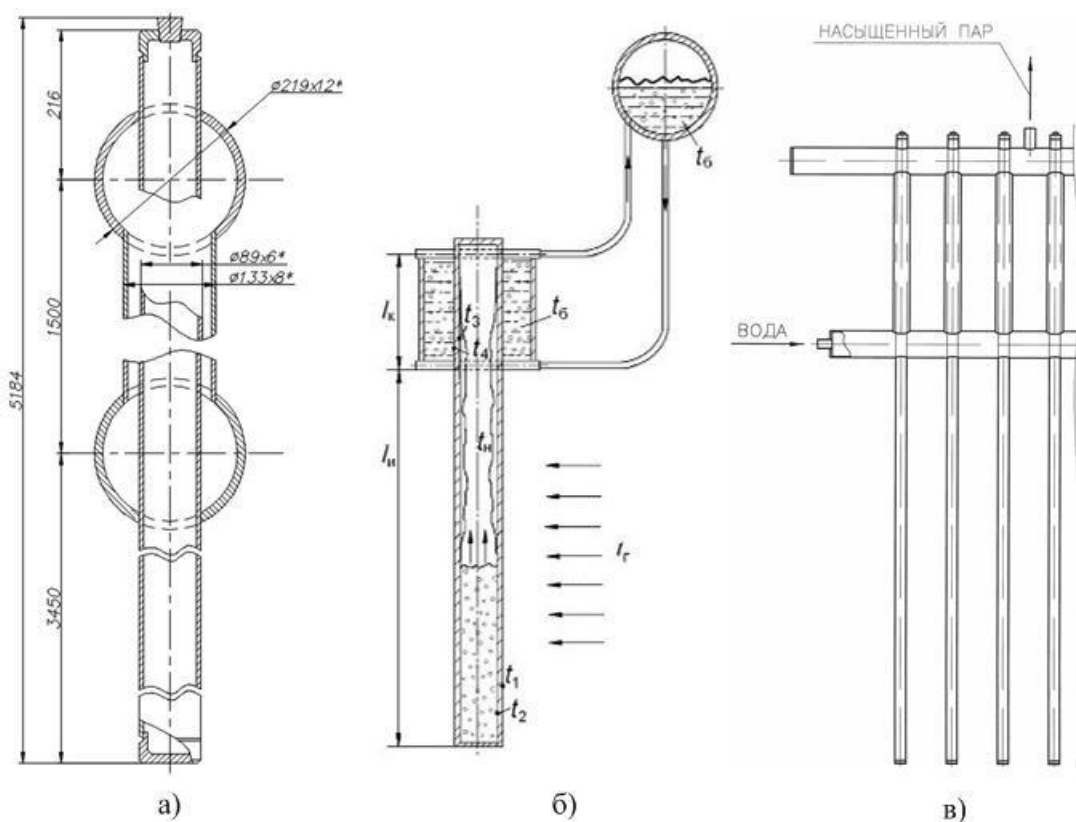


Рисунок 1: а) – продольный разрез термосифона; б) схема термосифона с барабаном-сепаратором; $l_{и}$ – длина зоны испарения, l_k – длина зоны конденсации, t_r , t_6 , $t_{и}$ – температуры газа в барабане-сепараторе, насыщения, t_1, t_2, t_3, t_4 – температуры наружных и внутренних стенок в зоне испарения и зоне конденсации; в) – блок термосифонов котла-утилизатора

При подготовке к проведению теплотехнических испытаний были спроектированы и изготовлены вспомогательные устройства для измерения технологических параметров термосифонов (гильзы, устройства для измерения температур, бобышки и проч.).

Измерения температур в различных точках в полости термосифона, на поверхности труб в зоне охлаждения и конденсации осуществляли с использованием термоэлектрических преобразователей типа ДТПК 035-0111, ДТПК 021-1,2/2 и др. В двух термосифонах было установлено устройство для измерения температуры в нескольких точках по высоте полости термосифона, длиной 4,3 м. [4]. Для передачи данных ко вторичным преобразователям использовались термокомпенсационные провода типа ПТГВ-ХА и ПТГВ-ХК. Измерительная система состоит из следующих элементов: модуль ввода аналоговый (МВА-8) – 5 шт., модуль сбора данных (МСД-200) с электронным накопителем. Датчик теплового потока представляет собой теплообменник типа «труба в трубе». Принцип работы устройства следующий: вода подается во входной патрубок, проходит по внутренней трубе и попадает в межтрубное пространство, после – возвращается и покидает устройство. Материал устройства – нержавеющая сталь марки 08х18н10т. Проводились измерения следующих параметров: расход воды, температуры воды на входе и на выходе из устройства.

Дополнительно были проведены измерения температуры технологических газов с помощью отсосной термопары, что позволило получить более точные показания температуры газов за счет устранения погрешности, возникающей в топке из-за радиационного теплообмена. Погрешности измерений температуры и теплового потока составили соответственно $\pm 1,5\%$ и $\pm 3,4\%$.

С помощью ультразвукового расходомера «Portaflow 330» проводили измерения расхода котловой воды, поступающей из барабана-сепаратора котла-утилизатора в контур охладителя блока термосифона, который составил 64-68 м³/ч.

С помощью стационарно установленных приборов учета фиксировались следующие показатели: температура технологических газов на входе в котел-утилизатор, температура после термосифонов, расход природного газа, сжатого

воздуха и дутьевого воздуха, поступающего в печь, расход вырабатываемого пара, его давление и температура.

По результатам фотоэлектрического спектрального анализа стенок труб термосифонов, ранее вышедших из строя (рисунок 2), установлено, что в качестве материала была использована сталь 10 (в соответствии с ГОСТ 1050-2013). С помощью метода ультразвуковой толщинометрии определено, что толщина стенок труб термосифонов по результатам 14-месячной кампании теплоутилизационной



Рисунок 2 – Термосифоны, вышедшие из строя

установки варьируется в пределах от 3,2 до 5,6 мм. Это объясняется эрозийным износом из-за высокой запыленности отходящих газов.

Выполнены отборы пыли, оседающей на испарительной части термосифона. Определен

химический состав элементов пыли с помощью микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе, а также измерен коэффициент теплопроводности пыли на установке «HFM 436 Lambda».

Проведенные расчеты показали, что скорость пара, испаряющегося в термосифоне, находится на уровне 0,57 м/с, а скорость стекающей пленки может достигать до 1,24 м/с, в зависимости от тепловых нагрузок.

Выполнен расчет допустимого давления на испарительном участке термосифона при различных нагрузках. При рабочей температуре стенки 255°C предельно допустимое давление внутри термосифона ограничено прочностью трубы и значением $[p] \leq 15,76 \text{ МПа} = 157,6 \text{ ати}$. Минимально допустимая толщина стенки при напряжениях на разрыв 1500 кгс/см² и давлении в термосифоне 30 атм. составляет менее 1 мм. Дополнительные данные для теплового расчета котла-утилизатора были определены из автоматизированной системы управления технологическим процессом предприятия.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и расчетов теплотехнических показателей работы термосифонов.

Эксперименты показали степень влияния изменения температуры газов и воздействие системы газоимпульсной очистки на температуру в полости термосифонов и на температуру стенок термосифонов (рисунок 3). Кроме того, наблюдается изменение измеренной температуры в полости термосифона по высоте, рисунок 3, г).

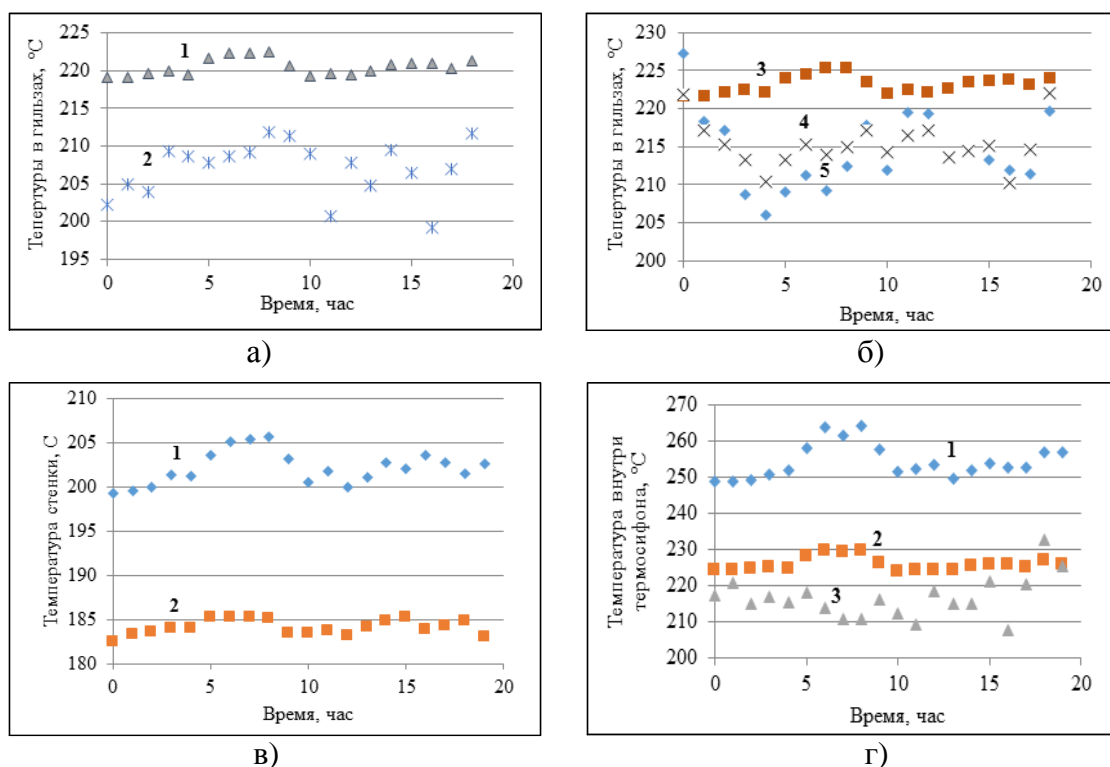


Рисунок 3: а), б) – температура в гильзах термосифонов длиной: 1500 мм (точки 1, 2) – установлены в 1 и 4 блоках термосифонов, 1000 мм (точки 3, 4) – во 2 и 3 блоках, 500 мм (5) – в первом блоке; в) – температура стенки термосифона над охладителем, близкая к температуре насыщения (1); температура стенки охладителя термосифона (2); г) – изменение температуры по высоте внутри полости термосифона: 1 – температура в нижней части полости термосифона, 2 – температура в средней части полости термосифона, 3 – температура в верхней части полости термосифона

Устройство для измерения температуры по высоте термосифона измеряет усредненную температуру, зависящую от температуры стенки, конденсата и пара.

А температура стенки по высоте термосифона меняется на 60°C , что и приводит к изменению измеренной температуры по высоте термосифона.

Изменение измеренной плотности теплового потока в разных точках газохода составило от 80 до 108 кВт/м^2 . Показания отсосной термопары оказались выше на $\sim 70^{\circ}\text{C}$ показаний стационарно установленной термопары. Это связано с излучением на термопару относительно холодных стен газохода, а также с налипанием пыли на горячий спай стационарного термоэлектрического преобразователя, установленного на теплоутилизационной установке.

При проведении тепловых расчетов котла-утилизатора с термосифонами за основу был взят нормативный метод ОАО «НПО «ЦКТИ»¹, а также методические подходы Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова (Беларусь)².

На рисунке 4 приведен пример сравнения расчетных и экспериментально полученных температур пара в термосифонах, распределенных по блокам в направлении течения горячего газа. Предполагается, что все термосифоны в одном ряду находятся в одинаковых условиях.

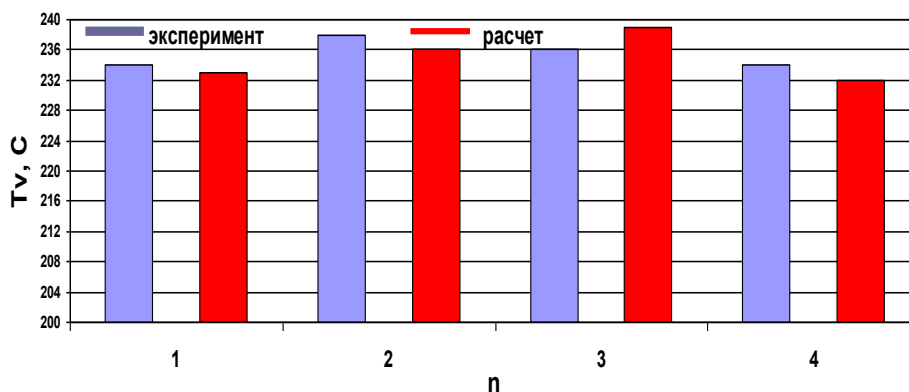


Рисунок 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по температуре пара в термосифонах. Температура входящего технологического газа – 924°C . Расход технологического газа – $93000 \text{ м}^3/\text{час}$, n – номер ряда термосифонов в теплообменнике

¹ Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб, 1998. 256 с.

² Васильев Л. Л., Киселев В. Г., Матвеев Ю. Н., Молодкин Ф. Ф. Теплообменники-утилизаторы на тепловых трубах. Минск, 1987. 200 с.

При расчетах учитывалось, что значения коэффициента конвективной теплоотдачи для первых двух рядов ниже, чем для последующих, а температура газов уменьшается после прохождения каждого ряда термосифонов. Как видно из рисунка 4 и таблицы 1, расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно соответствуют друг другу (обозначения в таблице: t_v – температура пара в термосифоне, Q – мощность одного термосифона в ряду, t_g – температура газа). В таблице 2 приведены основные характеристики пленки конденсата (Q – передаваемый тепловой поток, δ – толщина пленки конденсата в нижней части конденсатора термосифона, S – площадь сечения пленки конденсата в нижней части конденсатора термосифона, V – средняя скорость течения пленки конденсата в нижней части конденсатора термосифона).

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Ряд ТС	$t_v^{расч.}, ^\circ\text{C}$	$t_v^{эксп.}, ^\circ\text{C}$	$Q_{ТС}, \text{Вт}$	$t_{g\text{ вх.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{g\text{ вых.}}^{расч.}, ^\circ\text{C}$	$t_{g\text{ вых.}}^{эксп.}, ^\circ\text{C}$
1	247	245	78 800	869	849	–
2	244	–	74 900	849	828	–
3	240	–	70 900	828	810	–
4	238	231	67 600	810	791	760
1	270	271	135 000	1011	967	–
2	260	–	120 000	967	933	–
3	253	–	110 000	933	905	–
4	248	248	102 000	905	876	850

Таблица 2 – Характеристики пленки конденсата в нижней части конденсатора термосифона

$Q, \text{Вт}$	1000	10 000	20 000	50 000	70 000	10 0000
$\delta, \text{м}$	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$
$S, \text{м}^2$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$4,58 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$5,77 \cdot 10^{-5}$
$V, \text{м/с}$	0,058	0,268	0,425	0,783	0,98	1,24

В таблице 3 приведены типичные значения величин термических сопротивлений: R_g – от газа к стенке испарителя, R_{we} – стенки испарителя, R_e –

испарения (кипения), R_c – конденсации, R_{wc} – стенки конденсатора, R_{out} – от стенки конденсатора к охлаждающей воде, R_{Σ} – сумма всех термических сопротивлений.

Таблица 3 – Типичные значения величин термических сопротивления для разных участков теплообмена в термосифоне

	R_g	R_{we}	R_e	R_c	R_{wc}	R_{out}	R_{Σ}
К/Вт	10^{-2}	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$
%	90,13	1,58	0,45	3,61	3,06	1,17	100

Как видно из таблицы 3, значения термических сопротивлений стенок испарителя и конденсатора, а также термического сопротивления испарения и конденсации и термическое сопротивление от стенки конденсатора к охлаждающей воде соизмеримы между собой, но суммарно не превышают 10% от общего термического сопротивления.

На рисунке 5 приведены профили температуры поверхностей термосифона, расположенных в разных рядах группы термосифонов, состоящей из 4 блоков.

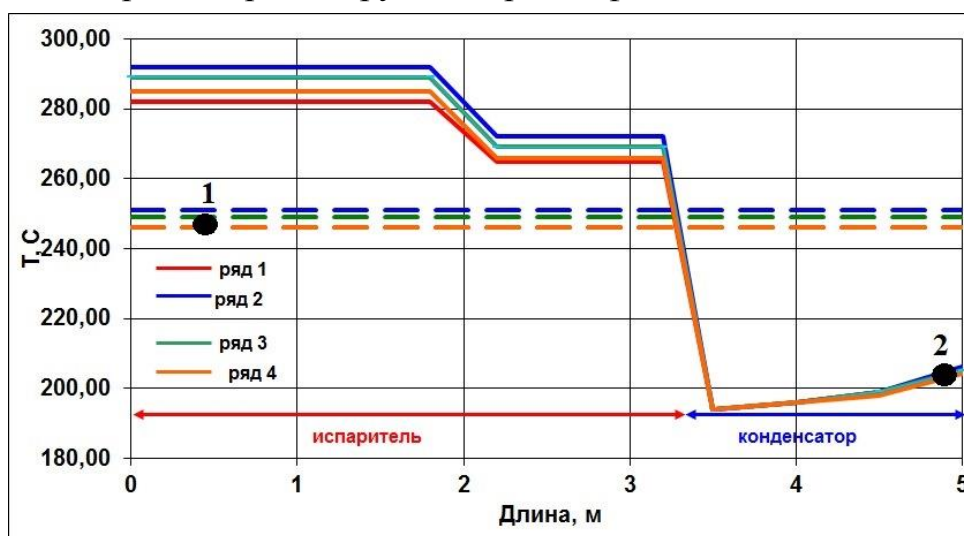


Рисунок 5 – Профили температуры поверхностей термосифонов в различных рядах теплообменника. Пунктирная линия – температура пара. Точки 1, 2 – экспериментальное значение температур стенок термосифона

Профили построены, исходя из модели теплообмена в испарителе в виде двух зон – в затопленной нижней части испарителя и в его верхней части, где расположена пленка кипящей стекающей жидкости. Неизотермичность

поверхности конденсатора определяется изменением толщины пленки конденсата по его высоте.

Проведенный комплексный анализ проб пылевых отложений позволил определить ее коэффициент теплопроводности (таблица 4), а также получить уравнение зависимости: $\lambda=0,0006 \cdot t_{\text{пыли}}+0,147$.

Таблица 4 – Результаты испытаний пыли на установке «HFM 436 Lambda»

Средняя температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К	Термическое сопротивление, м ² *К/Вт	Температурный градиент, К/м	Время проведения испытаний, ЧЧ:ММ:СС
20,13	0,158	0,193	657,55	02:32:49
60,83	0,184	0,165	654,91	02:30:26
79,58	0,190	0,175	597,34	03:35:32

Таким образом, при температуре отложений пыли, равной 300°С, ее термическое сопротивление в общей сумме термических сопротивлений составляет 96,7 % (0,327 К/Вт.).

На рисунке 6 графически представлено влияние отложений пыли на теплопередачу при коэффициентах теплопроводности.

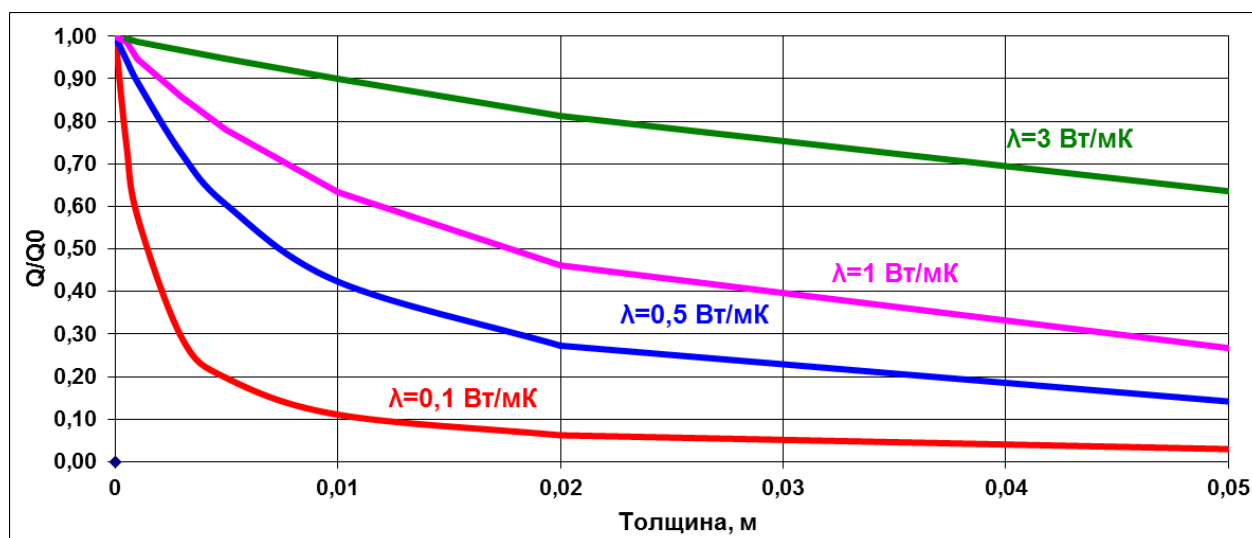


Рисунок 6 – Влияние отложений с различными характеристиками на эффективность теплопередачи термосифона. Q_0 – передаваемый тепловой поток при отсутствии отложений на стенке

Из рисунка 6 видно, что уже при толщине отложений в 0,01 м тепловая мощность блока термосифонов снижается в 3 раза.

В четвертой главе рассмотрены переходные процессы в термосифоне. Проведенные в главе 3 расчеты показали, что при увеличении температуры газов от 900°С до 1000°С температура стенки в зоне испарения в среднем выросла на 12,5°С, в зоне конденсации – на 3°С, и температура насыщения увеличилась на 12°С. Соответственно, затраченные теплоты составили: на нагрев стали в зоне испарения 237 кДж, на нагрев кипящей воды в зоне испарения 260 кДж, на нагрев стали в зоне конденсации 24,8 кДж. Таким образом, при протекании переходных процессов затраты теплоты на изменение температуры стенки трубы термосифона в зоне конденсации пренебрежимо малы по сравнению с количеством теплоты, воспринимаемой стенкой трубы термосифона и с кипящей водой в зоне испарения.

При изменении температуры газов на 100°С температура насыщения и температура стенки трубы термосифона в зоне испарения изменяется на 12°С. Поскольку в первом приближении температура насыщения и температура стенки термосифона практически совпадают, то уравнение для изменения температуры насыщения в термосифоне при изменении температуры газов в котле-утилизаторе можно записать в упрощенном виде как:

$$(M_m \cdot c_m + M_v \cdot c_v) \cdot \frac{dt_n}{d\tau} = k_u \cdot F_u \cdot (t_g - t_n) - k_k \cdot F_k \cdot (t_n - t_0) \quad (1)$$

Здесь: M_m и M_v – массы металла стенки трубы термосифона в зоне испарения и масса воды в термосифоне, кг; c_m и c_v – массовые теплоемкости металла и воды, кДж/(кг·К); k_u, k_k – коэффициенты теплопередачи в зонах испарения и конденсации, Вт/(м²·К); F_u, F_k – площади поверхности теплообмена в зонах испарения и конденсации, м²; τ – время, с.

В начальный момент времени, равный $\tau=0$, в стационарном состоянии температура насыщения находится из условия $dt/d\tau=0$ и равна $t_{n,0}$. Пусть далее температура газов скачком изменяется до значения t_g , при этом с течением какого-то времени изменится и температура насыщения в термосифоне до конечного значения, равного t_k .

Введем безразмерную температуру $\vartheta = t_n/t_{\sigma}$ и безразмерное время, равное $\sigma = \tau \cdot \frac{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F}{M_m \cdot c_m + M_g \cdot c_g}$. Тогда уравнение для изменения безразмерной температуры насыщения запишется в следующем виде

$$\frac{d\vartheta}{d\sigma} = \vartheta_k - \vartheta \quad (2)$$

При его интегрировании получим решение в следующем виде:

$$\vartheta = \vartheta_k - (\vartheta_k - \vartheta_{n,0}) \cdot \exp(-\sigma) \quad (3)$$

Расчеты по (3) при изменении температуры газов от 900 до 1000°C приведены на рисунке 7.

В начальный момент времени температура насыщения равна $t_{n,0}$, и наблюдается равенство подведенного и отведенного количества теплоты:

$$k_u \cdot F_u \cdot (t_{2,0} - t_{n,0}) - k_k \cdot F_k \cdot (t_{n,0} - t_{\sigma}) = 0 \quad (4)$$

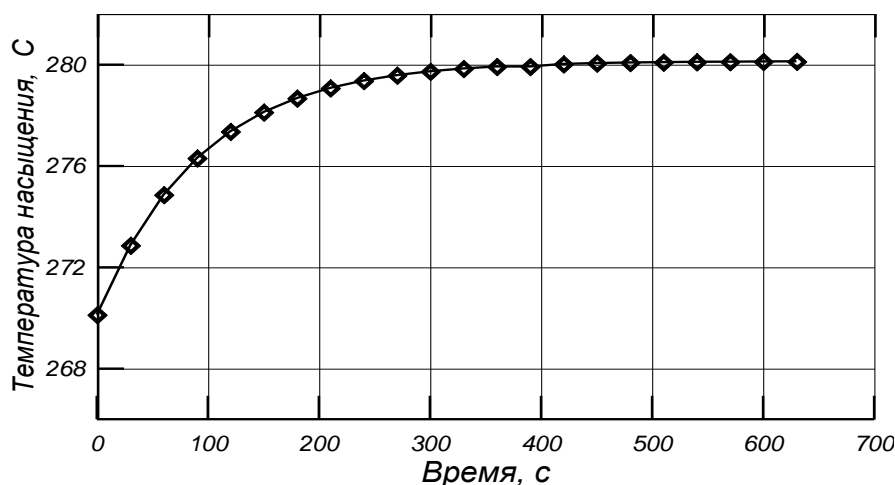


Рисунок 7 – Изменение температуры насыщения в термосифоне при ступенчатом увеличении температуры газов от 900°C до 1000°C

При резком изменении температуры газов от $t_{2,0}$ до t_2 температура насыщения в термосифоне возрастает от начальной t_n до t_k .

Вычитая из (1) выражение (4), получим:

$$(M_m \cdot c_m + M_g \cdot c_g) \cdot \frac{dt_n}{d\tau} = k_u \cdot F_u \cdot (t_2 - t_n) - k_k \cdot F_k \cdot (t_n - t_{\sigma}) - k_u \cdot F_u \cdot (t_{2,0} - t_{n,0}) + k_k \cdot F_k \cdot (t_{n,0} - t_{\sigma}) = k_u \cdot F_u \cdot (t_2 - t_{2,0}) - (k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k) \cdot (t_n - t_{n,0})$$

Введя традиционно используемые обозначения при описании свойств объектов автоматического регулирования $t_c - t_{c,0} = x$ и $t_n - t_{n,0} = y$, получим уравнение одноемкостного статического объекта в виде:

$$T \cdot \frac{dy}{d\tau} + y = K_y \cdot x \quad (5)$$

Здесь постоянная времени представляет собой следующий комплекс, имеющий размерность времени

$$T = \frac{M_m \cdot c_m + M_v \cdot c_v}{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k}, \quad (6)$$

а коэффициент усиления равен

$$K_y = \frac{k_u \cdot F_u}{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k} \quad (7)$$

Для термосифонов, используемых в рассматриваемом котле-утилизаторе, постоянная времени составляет 111 секунд, коэффициент усиления равен 0,1.

На величину постоянной времени основное влияние оказывает массовая теплоемкость металла термосифона и воды в нем, а также произведение коэффициентов теплопередачи и площади поверхности в зоне испарения и конденсации.

Организовать ступенчатое изменение температуры на промышленной печи практически невозможно из-за инерции самой печи и необходимости соблюдения регламента пуска и останова. На рисунке 8 приведено: изменение расхода топливного газа при останове печи, изменение температуры газов на выходе из конвективного газохода и соответствующее изменение температур насыщения в термосифонах.

Для получения зависимостей изменения температуры газа со временем была получена аппроксимация на линейном участке изменения температуры газов.

На рисунке 8 приведено сопоставление расчетов по (1) с экспериментальными данными. Расчеты изменения температуры насыщения в термосифоне проведены во временном интервале от 90 до 160 мин. Возмущение температурой газов начинается с 90-ой минуты, а на 150-ой минуте температура

газов становится ниже температуры кипения воды в барабане. При этом кипение в термосифоне прекращается, и в дальнейшем происходит просто охлаждение термосифона и воды в нем. Как следует из сопоставления линейных аппроксимаций, изменения температуры газов, рисунок 8, б), и изменения температуры насыщения в термосифонах, рисунок 8, в), тангенс угла наклона линейной аппроксимации переходного процесса для температуры газов составляет 2,57, а для температуры насыщения в термосифоне – 0,257, то есть отличается в 10 раз. Эти данные соответствуют расчетному значению коэффициента усиления, равному 0,1, рассчитанному для параметров существующего термосифона.

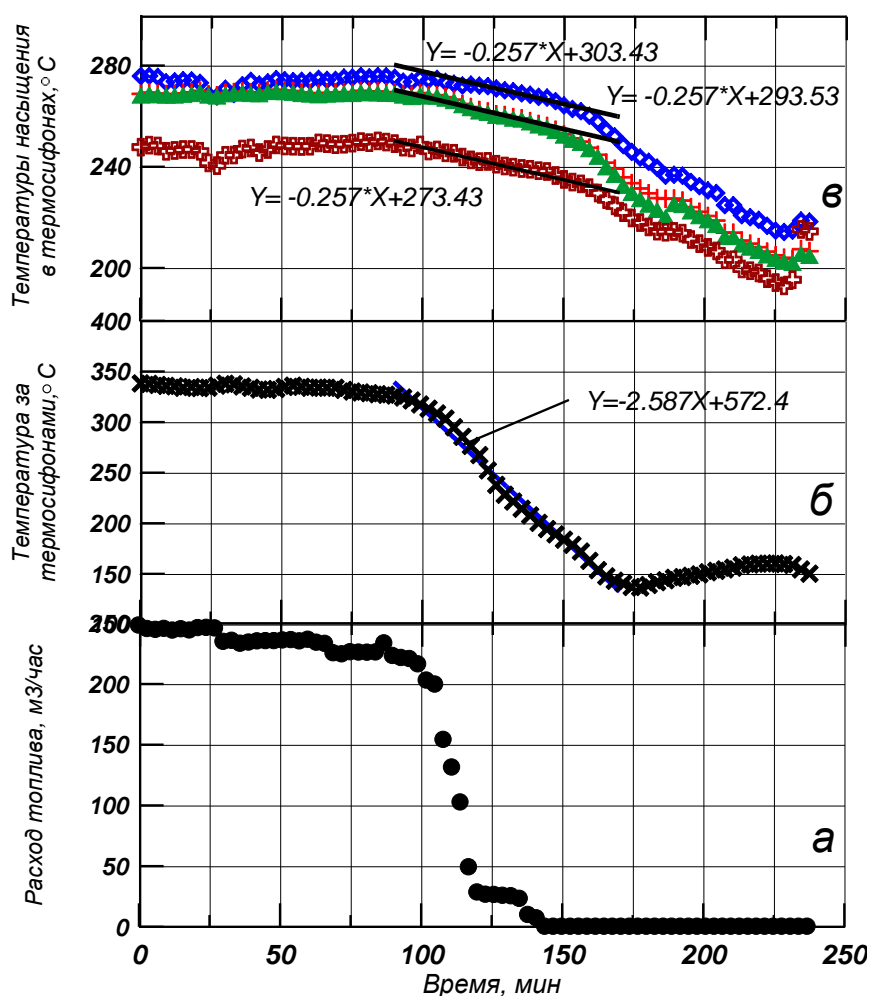


Рисунок 8 – Изменение расхода топлива (а) и температуры на выходе из КГ (б) и температуры насыщения в различных термосифонах (в) при останове печи

Проведен анализ возможных причин, приводящих к разрыву термосифонов. Основная из них – нарушение циркуляции в контуре охлаждения, которое приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи в зоне конденсации с 900

Вт/(м²·К) до 500 Вт/(м²·К) и, как следствие, к увеличению давления в термосифоне свыше 100 атм. Увеличение длины зоны конденсации и организация регулярных продувок коллекторов блоков термосифонов приведет к увеличению надежности работы котла-утилизатора. Вторая причина связана с потерей части теплоносителя при заполнении термосифонов. Это приводит к неполному омыванию внутренней поверхности термосифона, перегреву участка труб и снижению предельно допустимого давления. Предложено производить заполнение и герметизацию термосифонов на неработающем газоходе с применением технологии вакуумирования.

Результаты расчетов по разработанной модели показали совпадение экспериментальных данных с расчетными даже при замене линейного возмущения расхода газов ступенчатым.

В пятой главе приведено описание ряда технических решений, которые позволят повысить эффективность работы термосифонов как в части увеличения тепловосприятия, так и в части снижения количества выходов из строя. Выявлены недостатки при заполнении термосифонов конструкции ОАО «Уралэнергоцветмет» с внешним подогревом теплоносителя.

Предложено несколько способов вакуумирования термосифонов, а также сформулирована последовательность операций при вакуумировании термосифонов разными способами, апробированными на практике. Предложен порядок изготовления термосифонов и их заполнения без привязки к запуску металлургического агрегата.

Наиболее практичным и обоснованным с экономической точки зрения является способ, при котором изменена конструкция доньшка термосифона, применены пробка с резьбой, паронитовая прокладка и ниппель-ерш. В этом случае предполагается применение оптимального количества комплектующих деталей, резьбовых соединений и сварных стыков. Стоит отметить, что по результатам промышленной эксплуатации термосифонов (с апреля 2017 г. по июнь 2018 г.), вакуумированных дынным способом, из 42 термосифонов ни одного не вышло из строя.

В главе 5 также приведено несколько технических решений, обобщенных из опыта проектирования и эксплуатации котлов-утилизаторов. Среди них: организация периодической продувки и ее автоматизация, использование «пояса жесткости» и систем очистки поверхностей термосифонов, обработка поверхностей нагрева антикоррозийным покрытием на основе битумных лаков и др. Сформулированы рекомендации по изготовлению блоков термосифонов для котлов-утилизаторов металлургических предприятий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведены промышленные эксперименты с измерением фактических параметров работы отдельных термосифонов и блоков термосифонов при разных тепловых нагрузках. При помощи гильз измерены температуры внутри термосифонов, расположенных в четырех блоках, температуры стенок блока термосифона и стенок термосифона в испарительной и конденсационной частях. Получены показания устройства для измерения температуры по высоте термосифона [4], устройства для измерения теплового потока, термопары с защитным чехлом и эжектором для откачки газа.

2. Толщина стенок термосифонов по результатам кампании котла-утилизатора варьируется в пределах от 3,2 до 5,6 мм. На эмиссионном спектрометре определено, что в качестве материала термосифонов, вышедших из строя, была использована сталь 10.

3. Проведены тепловые расчеты блока термосифонов, а также их верификация с данными, полученными в рамках эксперимента. Рассчитан ряд теплотехнических характеристик термосифонов, таких как: предельно допустимое давление в полости термосифона, влияние отложений пыли на теплопередающие способности термосифона, характеристики пленки конденсата термосифона при разных тепловых нагрузках, значения термического сопротивления для разных участков теплообмена внутри термосифона и др.

4. Сформулирован механизм разрушения термосифонов. Расчет показал, что при нагревании стенки трубы до 480°C предельно допустимое давление составляет 58 кгс/см².

5. Разработана математическая модель переходных процессов для термосифона как объекта регулирования при ступенчатом возмущении изменением температуры газов. Результаты исследований показали совпадение экспериментальных данных с расчетными даже при замене линейного возмущения расхода газов ступенчатым.

6. Обобщены наилучшие технические и организационные мероприятия по повышению энергетической эффективности и надежности работы термосифонов, которые могут быть применены при проектировании и эксплуатации котлов-утилизаторов с термосифонами. В промышленных условиях, на предприятии ОАО «Святогор», отработано несколько способов заполнения и вакуумирования термосифонов, с внесением изменений в конструкцию доньшка термосифона.

7. Перспективы дальнейших разработок темы связаны с совершенствованием систем очистки термосифонов котлов-утилизаторов от налипания пылей и с подбором рабочих жидкостей (теплоносителей) и материалов для изготовления термосифонов, а также с применением специализированных покрытий для защиты поверхности нагрева.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах

и изданиях, определенных ВАК

1. Папченков А. И. Моделирование процесса конденсации водяного пара из парогазовой смеси в полости термосифона / В. А. Мунц, **А. И. Папченков** // Энергетик. – 2014. – № 8. – С. 45-47.; 0,075 п.л./0,035 п.л.

2. Папченков А. И. Термосифоны и их применение в технике / Л. Л. Васильев, **А. И. Папченков**, Л. П. Гракович, Л. Л. Васильев мл. // Тепловые процессы в технике – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 11-23.; 0,3 п.л./0,08 п.л.

3. Папченков А. И. Переходные процессы в термосифонах / В. А. Мунц,

А. И. Папченков, Е. Ю. Павлюк, Д. Р. Даминов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика» – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 5-13.; 0,2 п.л./0,07 п.л.

Патенты:

4. Патент на полезную модель № 127458 Российская Федерация, G01K 7/12 (2006.01). Устройство для измерения температуры / Мунц. В.А., **Папченков А.И.**, Папченков И.Н.; заявитель и патентообладатель Мунц. В.А., Папченков А.И., Папченков И.Н. – № 2012149120/28; заявл.19.11.2012, опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

5. Патент на полезную модель № 146019 Российская Федерация, F28D 15/02 (2006.01). Устройство для вакуумирования термосифонов / Мунц. В.А., **Папченков А.И.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – № 2013153516/06; заявл. 03.12.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.

Монографии:

6. Папченков А. И. Особенности эксплуатации и методы расчета процессов теплообмена в термосифонах при охлаждении технологических газов / В. А. Мунц, **А. И. Папченков**, Н. А. Шахлина // Итоги науки. Т. 1. – Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М.: РАН, 2013. – С. 73-92.; 0,48 п.л./0,2 п.л.

Публикации автора в иных изданиях:

7. Папченков А. И. Особенности эксплуатации котлов-утилизаторов с термосифонами / А. В. Мунц, **А. И. Папченков**, Ю. А. Каграманов // Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере»: материалы. Челябинск, 22-26 апреля 2013 г. / под ред. Е.В. Торопова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 225-229.; 0,1 п.л./0,05 п.л.

8. Папченков А. И. Характеристики пылевых отложений и их влияние на эффективность работы термосифонов котлов-утилизаторов отражательных печей / В. А. Мунц, **А. И. Папченков**, Ю. А. Каграманов // Энергетики и металлурги

настоящему и будущему России: материалы 14-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов / под общей редакцией Е. Б. Агапитова. – Магнитогорск: Издательство Магнитогорского гос. техн. ун-та, 2013. – С. 55-58.; 0,06 п.л./0,03 п.л.

9. Папченков А. И. Определение оптимально допустимого давления в полости термосифона при утилизации тепла технологических газов / В. А. Мунц, **А. И. Папченков**, Н. В. Куликова // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: сб. науч. тр. – Саратов: Изд-во Саратовского гос. техн. ун-та, 2014. – С. 25-32.; 0,18 п.л./0,06 п.л.

10. Папченков А. И. Результаты проведения промышленного эксперимента по измерению рабочих параметров термосифонов котла-утилизатора / В. А. Мунц, **А. И. Папченков** // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 3. – Киев. – С. 83-87.; 0,1 п.л./0,05 п.л.

11. Папченков А. И. Исследование переходных процессов в термосифонах / В. А. Мунц, **А. И. Папченков**, Е. Ю. Павлюк, А. С. Осминкина // VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ 2017 г.) с международным участием: сб. докл. Екатеринбург, 11-12 мая 2017 г. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2017. – С. 78-82.; 0,35 п.л./0,09 п.л.

12. Papchenkov A. I. Thermosyphon as a control unit depending on the stepwise perturbation by temperature variation of the cooled gases / **A. I. Papchenkov**, V. A. Munts, E. Yu. Pavlyuk, D. B. Skhoinzonov // Proceedings of the X Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources». Minsk, Belarus, 10-13 September, 2018. – Minsk, 2018. – P. 468-475.; 0,38 п.л./0,1 п.л.