

На правах рукописи



РАДЬКО СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРОВОДЯНОГО ПЛАЗМОТРОНА**

05.09.10 – Электротехнология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Аньшаков Анатолий Степанович

Официальные оппоненты: **Кувалдин Александр Борисович**,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки,
Национальный исследовательский
университет “Московский
энергетический институт”,
профессор кафедры “Автоматизированные
электротехнологические установки и
системы”
Кузьмин Виктор Иванович,
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А.
Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук, старший
научный сотрудник лаборатории
Физики плазменнодуговых и лазерных
процессов.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
проф. образования «Сибирский
федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится 29 января 2015 года в 13⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом
университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан ноября 2014г.

Учёный секретарь
диссертационного совета д.т.н., профессор



Нейман В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При современном уровне развитии промышленности проблема переработки техногенных отходов приобретает первостепенное значение. Крупные промышленные компании и муниципальные структуры в этой ситуации вынуждены вкладывать значительные средства в уничтожение отходов. Особо острая ситуация сложилась с отходами, являющимися источниками вредных и токсичных веществ. Эти отходы, как правило, не могут быть захоронены и требуют специальных плазменных технологий утилизации.

Термический метод сжигания отходов не оправдал экологические надежды человечества.

Наиболее перспективной технологией утилизации техногенных отходов является паровая плазмохимическая переработка, основанная на высокотемпературном воздействии и полном разложении утилизируемых продуктов с помощью дуговой термической плазмы водяного пара. В результате на выходе получается синтез-газ, который представляет собой смесь водорода и оксида углерода и является ценным энергетическим сырьем. При этом плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом.

Электротехнологический комплекс для реализации плазменной технологии переработки/утилизации различного вида отходов представляет собой комплект электротехнологического, теплотехнического, электрогенерирующего и экологического блоков.

Основополагающим из них являются плазменные электропечь с расплавом шлака, оснащённая электродуговым пароводяным плазмотроном и системами электро-, газо- и водоснабжения. Центральное место здесь занимает генератор плазмы водяного пара, как преобразователь электрической энергии в высокотемпературный поток окислителя, от надёжности работы которого зависит эффективность электротехнологии в целом.

Разработка новой конструктивной схемы генератора пароводяной плазмы невозможна без знания и понимания особенностей высокотемпературных процессов, протекающих как в газоразрядной камере плазмотрона, так и в самой плазменной электропечи. Для анализа высокотемпературного процесса газификации органической части отходов и температурных полей в электродах плазмотрона необходимо применять программы численных расчётов.

Из производственной практики и литературных источников известно также, что плазменный нагрев является достаточно энергозатратным, поэтому исследование комбинированного нагрева для переработки отходов (с использованием дугового и омического нагревов) является альтернативой традиционному способу, способной обеспечить меньшие затраты электроэнергии на реализацию электротехнологического процесса переработки техногенных отходов, а значит разработка и исследование новой энергоэффективной электропечи с пароводяным плазмотроном является своевременным и актуальным.

Объектом исследования является плазменная электропечь комбинированного нагрева с пароводяным плазмотроном, графитированным электродом и жидким шлаком, предназначенная для высокотемпературной переработки техногенных отходов.

Предмет исследования: электрические, энергетические и эксплуатационные характеристики пароводяного плазмотрона; термохимические процессы в плазменной электропечи; способ повышения энергоэффективности электропечи за счёт применения комбинированного нагрева.

Целью диссертационной работы является решение важной технологической задачи по созданию и исследованию новой конструктивной схемы пароводяного плазмотрона и энергоэффективной плазменной электропечи необходимых для реализации высокотемпературного электротехнологического процесса переработки техногенных отходов в электропечах комбинированного вида нагрева.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Разработать технические требования к конструкции плазменной электропечи и к её основному технологическому узлу – пароводяному плазмотрону.

2. Провести сравнительный анализ плазменной газификации углеродсодержащих отходов конкретного компонентного состава в воздушной и пароводяной плазме с целью обоснования применения водяного пара в качестве плазмообразующей среды как наиболее рациональной.

3. Разработать новую конструктивную схему пароводяного плазмотрона и сопутствующих ему технологических узлов – парогенератор, необходимый для подачи в плазмотрон перегретого водяного пара (300 ± 50 °С) и нагреватель воздуха, необходимый для питания плазмотрона подогретым воздухом на стадиях запуска и отключения (150 ± 10 °С).

4. Теоретически и экспериментально исследовать зависимость срока службы плазмотрона от распределения температурного поля в составном электроде – аноде для выбора наиболее рационального режима его охлаждения.

5. Экспериментально исследовать электрические, энергетические и эксплуатационные характеристики разработанного пароводяного плазмотрона в широком диапазоне определяющих параметров и согласовать их с требованиями электротехнологии переработки отходов в плазменных электропечах.

6. Исследовать энергоэффективность предлагаемой электротехнологии переработки отходов комбинированным нагревом.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Впервые предложена и реализована конструктивная схема однокамерного дугового плазмотрона с паровихревой стабилизацией дуги без применения сторонних защитных плазмообразующих сред. На предлагаемую схему получен патент на изобретение.

2. Определены и проверены на достоверность условия работы охлаждающей подсистемы плазмотрона, при котором обеспечивается неравномерное по длине охлаждение составного электрода – анода, в результате чего полностью исключается конденсация пара в электроразрядной камере и снижается износ электродов.

3. Впервые получены электрические и тепловые характеристики созданного пароводяного плазмотрона в широком диапазоне изменения силы тока и расхода водяного пара с целью управления технологическими параметрами плазменной электропечи.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Полученные зависимости эрозии медных трубчатых электродов (анода и катода) в среде водяного пара от времени, характеризующие продолжительный ресурс работы плазмотрона в целом (более 300 ч), соответствуют требованиям технологического процесса и указывают на возможность оперативного управления технологическими параметрами в рабочем режиме.

2. На основе анализа экспериментальных результатов по ресурсу электродов в различных плазмообразующих средах конструкция пароводяного плазмотрона, в отличие от традиционных схем, предполагает его эксплуатацию на обратной полярности подключения электродов к источнику питания.

3. Впервые предложена и численно решена задача по повышению энергоэффективности плазменной электропечи со шлаковым расплавом на подине за счёт использования дугового и омического нагрева.

На защиту выносятся:

1. Конструктивная схема пароводяного плазмотрона, как результат системного поиска наиболее рациональной схемы получения пароводяной плазмы на основе функционального, морфологического и информационного обеспечения, которая позволит обеспечить более устойчивый и продолжительный режим эксплуатации плазменной электропечи.

2. Результаты численных исследований процесса воздушной и пароплазменной переработки углеродсодержащих техногенных отходов; их сравнение.

3. Результаты численных исследований температурного поля в составном электроде – аноде и выбор наиболее рациональной конструкции этого узла.

4. Экспериментальные данные по ресурсным, энергетическим и электрическим характеристикам разработанного пароводяного плазмотрона, указывающие на возможность применения данного вида плазмотрона в плазменных электропечах комбинированного вида.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Решение поставленных задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях в области плазменной техники и теплофизики, разработанных научной школой академика М.Ф. Жукова. Фиксирование параметров процессов и наблюдение за ними осуществлялось с помощью современной измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Для теоретического анализа распределения температурного поля применялись апробированные аналитические и численные методы. Достоверность определения теплового потока в стенку электрода обеспечивается статистической обработкой большой выборки измерений. Достоверность численных результатов исследований подтверждается экспериментальными данными.

Использованы методы численного решения дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы с применением программного комплекса (ПК) ANSYS. Применялись методы планирования экспериментов, регрессионного анализа, оптимизации.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы приняты ОАО «Сибэлектротерм» для разработки и создания перспективных электротехнологических установок комбинированного плазменно-омического нагрева, предназначенных для переработки техногенных отходов, и внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки магистров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Личный вклад автора. В решении обозначенных задач автор принимал непосредственное участие. Автором были разработаны модели различных конструкций электрода – анода в ПК ANSYS и исследовано влияние энергии, выделяемой в разрядной камере плазмотрона, на распределение температурного поля в стенке электрода – анода и ресурс работы плазмотрона. Были проведены анализ и обобщение результатов исследований и подготовка публикаций.

Апробация работы: основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Всероссийской научной конференции с международным участием, «Наноматериалы и технологии», Улан-Удэ, 2012г; XVII Intern. Congress Energy Efficient, Economically sound, Educationally enforced electronechnologies, St. Petersburg, 2012; VII International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology», Minsk, 2012; VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твёрдого топлива», Новосибирск, 2012г; VI Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2013, Якутск, 2013г; XI Международная конференция «Газоразрядная плазма и её применения», г. Томск, 2013г; Всероссийская научная конференция молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2013г; Intern. Forum on Strategic Technology IFOST 2013, Ulaanbaator, Mongolia, 2013; Всероссийская (с международным участием) конференция “Физика низкотемпературной плазмы”, г. Казань, 2014.

Публикации: основное содержание диссертации опубликовано в 15 печатных работах, в том числе 5 в рецензируемых изданиях, вошедших в перечень рекомендованных ВАК РФ, 9 – в материалах международных и российских конференций, 1 патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение и список использованных источников. Работа изложена на

124 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 4 таблицы. Список использованных источников состоит из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, формулируются выносимые на защиту научные положения.

В первой главе приведены сведения о том, что в последние годы в зарубежной и отечественной технической литературе появилось значительное количество публикаций в основном рекламного характера по использованию плазменных источников энергии в установках высокотемпературной переработки техногенных отходов. В описанных технологиях применяемые генераторы низкотемпературной плазмы – плазмотроны работают, как правило, на воздушной плазмообразующей среде. С точки зрения плазмохимических реакций, протекающих в плазменном реакторе, оптимальным плазмообразующим газом является водяной пар. Однако широкое практическое распространение плазменных технологий на водяном паре сдерживается отсутствием надежных дуговых пароводяных плазмотронов с достаточным ресурсом непрерывной работы.

В известной литературе, как правило, рассматривают общие принципиальные вопросы проектирования плазмотронов для специалистов в данной области техники, а вопросы конструкции плазмотрона, определяющие его работоспособность, надёжность и эффективность обычно не рассматриваются. В главе представлен общий обзор основных принципиальных схем и конструкций существующих пароводяных плазмотронов, анализируя которые, была предложена новая схема пароводяного плазмотрона. Отражены основные аспекты, с которыми необходимо мириться при их эксплуатации, а также выдвинут ряд требований, которые необходимо соблюдать для достижения стабильной работы пароводяного плазмотрона.

Во второй главе обоснованы технические требования к конструкции энергоэффективной плазменной электропечи, включающую: пароводяной плазмотрон, графитированный электрод и ванну с расплавом шлака. На рисунке 1 представлена зона газификации предлагаемой электротехнологии и её электрическая схема замещения. Пароводяной плазмотрон обеспечивает подачу газифицирующего агента – водяного пара в плазменную печь, что в свою очередь приводит к более интенсивному процессу газификации исходного продукта – отходов и к значительному сокращению тепловых потерь всей плазменной электропечи. Наличие графитированного электрода и ванны с жидким шлаком в плазменной печи позволяет уменьшить вкладываемую мощность в пароводяной плазмотрон до 50%, что позволяет использовать при одинаковой производительности печи по переработке отходов плазмотрон меньшей мощности с большим ресурсом работы и сроком службы.

Дополнительным достоинством предлагаемой плазменной печи является отсутствие подового электрода, что позволит исключить более частый уход за подиной, обеспечить надёжное зажигание дуг, а также обеспечить интенсивное горизонтальное перемешивание расплава.

Предлагаемое техническое решение позволит выполнить переработку/уничтожение отходов с наиболее рациональным энерговыкладом в печь по сравнению с плазменными установками без дополнительного дугового и резистивного нагрева.

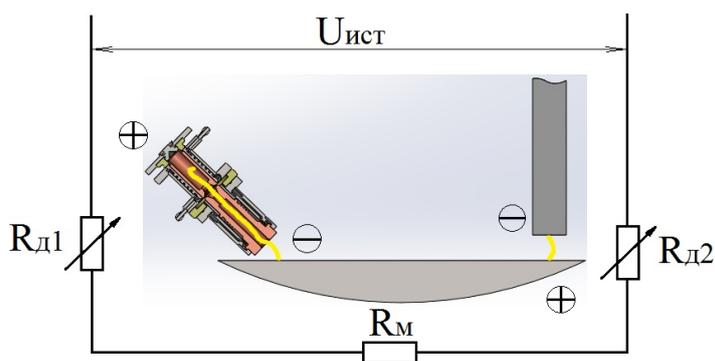


Рисунок 1 - Электрическая схема замещения

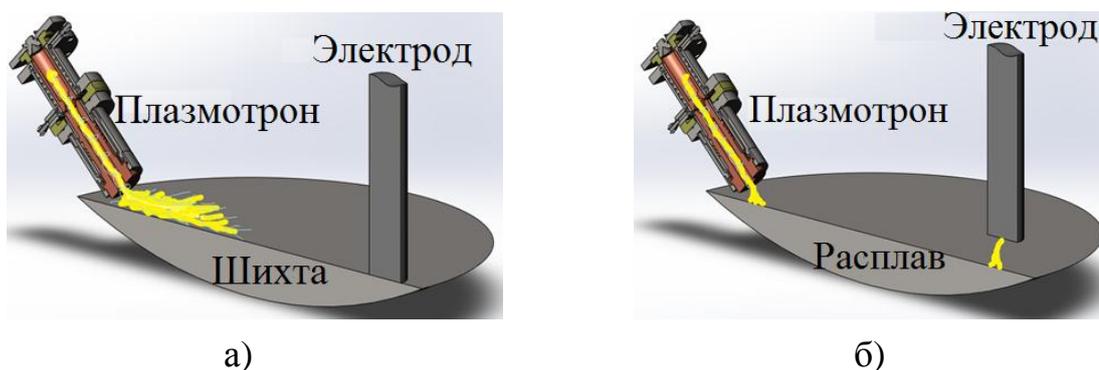


Рисунок 2 – Зона газификации плазменной электропечи:
 а) пусковой режим работы; б) основной режим работы

Технология уничтожения отходов в предложенном варианте реализуется в две стадии. Во время пускового режима работы происходит расплавление загруженной электропроводной шихты (рисунок 2, а). Графитированный электрод опускают до касания с шихтой, а плазматрон включают в косвенном режиме (дуга горит между анодом и катодом плазматрона). Исходящая струя плазмы начинает оплачивать верхние слои шихты и одновременно разогревать электрод. Через определённое время работы плазматрон переводят в основной режим работы (дуга замыкается на переплавляемую шихту), а электрод начинают приподнимать, образуя второй дуговой разряд между самим электродом и переплавляемой шихтой (вторая стадия плавки) (рисунок 2, б). Таким образом, электрическая цепь на второй стадии плавки замыкается по схеме: дуга плазматрона – шихта – дуга

электрода. Как только в ванне образуется расплав в плазменный реактор осуществляется загрузка отходов, после чего сразу начинается процесс газификации. При высокой температуре (около 1600 °С) в реакционной зоне в результате интенсивного разложения горючих составляющих образуются: шлаковый остаток и газ, содержащий в основном водород и оксид углерода (синтез – газ). Расплавленные негорючие включения непрерывно стекают в водяную ванну для образования гранул, а газы поднимаются вверх, проходя через опускающиеся отходы, после чего попадают в экологический блок очистки и камеру сжигания электрогенерирующего устройства.

Стоит отметить, что для обеспечения условий устойчивого горения электрической дуги суммарная длина двух дуг не должна превышать расстояние между ними. В противном случае дуги будут перемыкаться в пространстве над расплавляемым металлом, в печи в таком случае реализуется неэффективный режим пониженной мощности с одной, так называемой “косвенной” дугой.

Уравнение энергетического баланса плазменной электропечи с пароводяным плазмотроном имеет следующий вид:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (1)$$

здесь Q_1 – тепло, вносимое в установку с электрической энергией; Q_2 – тепло, вносимое в печь с отходами (если они заранее подогреты до определённой температуры); Q_3 – тепло, выделяемое в реакторе при протекании экзотермических реакций; Q_4 – тепло продуктов плавки и газификации – шлака и отходов; Q_5 – тепло, поглощаемое при протекании эндотермических реакций; Q_6 – все виды тепловых и электрических потерь установки.

В третьей главе представлен расчётно-теоретический метод исследования плазменно-энергетических процессов, протекающих в плазменной печи. Для исследования в качестве техногенных отходов были выбраны медико-биологические следующего состава (масс. %): $C = 20,9$; $H = 2,65$; $O = 14,14$; $N = 0,83$; $S = 0,08$; $Cl = 2,08$; $SiO_2 = 10,4$; $H_2O = 48,92$ общей массой 100 кг. Органическая масса указанного состава отходов составляет около 90 %, а минеральная – около 10 %. Расчёты процессов газификации были выполнены для температуры 1200 °С и атмосферного давления 0,1 МПа.

Основными уравнениями химических реакций, протекающих в высокотемпературной зоне газификации, являются:



$$K = \frac{[CO] + [H_2O]}{[CO_2] + [H_2]} = 2,5. \quad (5)$$

В результате проделанных расчётов (с применением ПК АСТРА-4) было установлено, что при достижении термодинамического равновесия

газовая фаза в случае пароводяной газификации состоит в основном из синтез-газа $CO + H_2$, а при воздушной газификации в неё дополнительно входит ещё и молекулярный азот N_2 . Как известно, молекулярный азот на выходе из реактора, взаимодействуя с кислородом, способен образовывать опасные соединения NO_x , что потребует дополнительно к установке применять более совершенную систему газоочистки. Также установлено, что на концентрацию водорода и монооксида углерода, как и на суммарную концентрацию H_2O и CO_2 сильное воздействие оказывают исходная влажность и процентное содержание углерода в отходах.

Пароплазменная газификация позволяет перевести органическую массу отходов в более калорийный синтез-газ и к тому же свободный от оксида азота. Из графиков (рисунок 3, а) видно, что калорийность получаемого синтез-газа больше в случае применения в качестве плазмообразующей среды – водяного пара. На рисунке 3, б представлены зависимости выделяемого тепла в реакторе в результате протекания эндо- и экзотермических реакций при использовании различного количества и сорта плазмообразующего газа. Из графиков видно, что при использовании воздуха в качестве плазмообразующей среды тепла в плазменной электропечи выделяется больше, чем при использовании водяного пара.

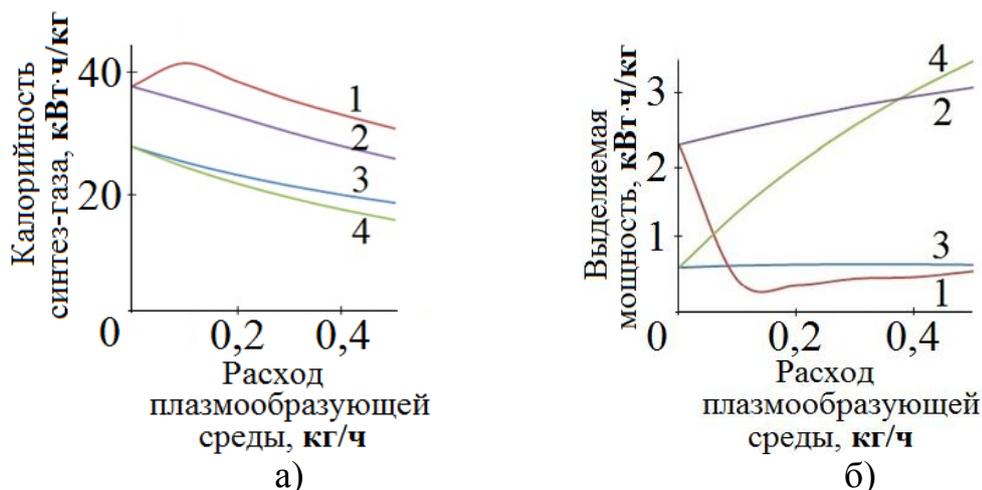


Рисунок 3 – Зависимость калорийности получаемого синтез-газа а) и выделяемого тепла в результате хим. реакций в плазменной печи б) от расхода плазмообразующей среды:

- 1, 3 – плазмообразующая среда водяной пар при исходной влажности отходов 15 и 50% соответственно;
- 2, 4 – плазмообразующая среда воздух при исходной влажности отходов 15 и 50% соответственно

Представленная методика расчёта газификации позволяет определить уровень вводимой в плазменную электропечь электрической мощности в зависимости от расхода газа-окислителя, морфологического состава отходов, производительности электропечи.

В четвёртой главе обоснованы технические требования к конструкции пароводяного плазмотрона. Основу исследуемого однокамерного плазмотрона составляют два полых составных (из медного и стального слоев) трубчатых электрода ступенчатой геометрии, разделённых термостойким изолятором (рисунок 4). Толщина стальной обечайки δ выбрана по известной инженерной методике расчёта двухслойной стенки. Внутренний электрод служит анодом (диаметр до уступа $d_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ м), выходной электрод – катодом (диаметр до уступа $d_2 = 16 \cdot 10^{-3}$ м). Соотношения D_1/d_1 и D_2/d_2 составляют 1,5 и 1,8 соответственно, а длины l_1 и l_2 изменялись в процессе экспериментов. Кольцо закрутки расположено в термостойком изоляторе, что позволяет организовать осевую стабилизацию дугового разряда на участках l_1 и l_2 .

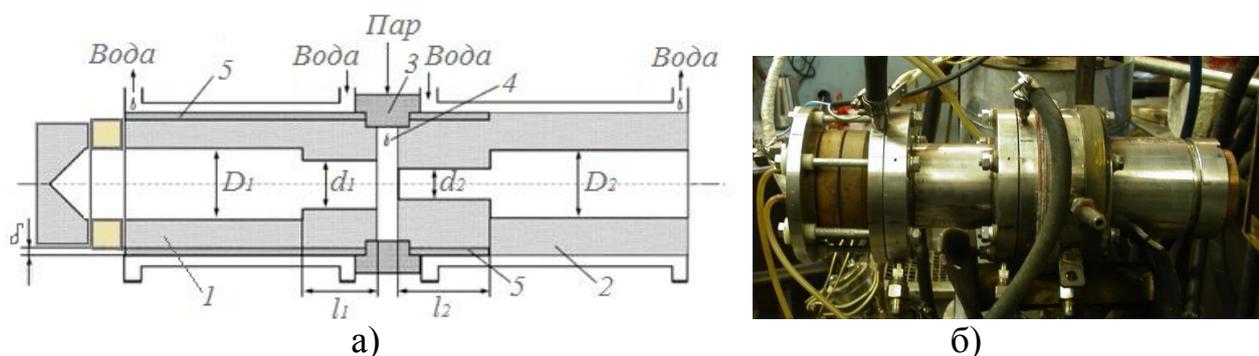


Рисунок 4 – Конструктивная схема а) и фотография б) пароводяного плазмотрона: 1 – анод, 2 – катод, 3 – изолятор, 4 – кольцо закрутки, 5 – стальной цилиндр

Нагреватель воздуха (рисунок 5, а) обеспечивает подачу подогретого до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ воздуха в плазмотрон на стадии его запуска и отключения с целью исключения конденсации. Парогенератор (рисунок 5, б) обеспечивает подачу перегретого до $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ водяного пара в плазмотрон в основном режиме его работы. Нагреватель воздуха и парогенератор разрабатывались по известным инженерным методикам расчёта спиралевидных нагревателей.



Рисунок 5 – Фотографии нагревателя воздуха а) и парогенератора б)

В результате проведённых экспериментов было установлено, что распределение теплового потока в стенку по длине неравномерно и условно его можно разделить на три зоны: I – зона минимальных тепловых потоков, II – зона максимальных тепловых потоков, III – зона входа и истечения нагретого газа (рисунок 6).

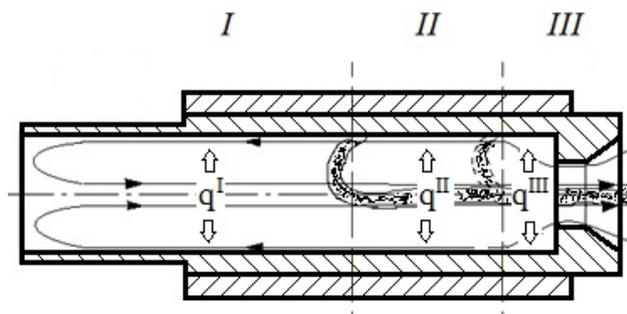


Рисунок 6 – Распределение теплового потока, поступающего в стенку электрода

Зона I. В этой зоне рабочая среда – водяной пар движется вдоль электрода у его стенки и возвращается обратно по его оси (движение водяного пара на рисунке 6 обозначено стрелками). Тепловой поток в стенку I состоит лишь из конвективного теплового потока q_K^I :

$$q^I = q_K^I. \quad (6)$$

Зона II. Зона горения дуги. Опорное пятно дуги не только вращается по рабочей поверхности электрода, но и перемещается вдоль оси в определённых границах. В экспериментах длина зоны II составляла $\approx 1,5 \div 2D$. Такая малая зона выработки и явилась причиной повышенной эрозии, так как основная термическая нагрузка приходится именно на эту малую область внутренней поверхности электрода, а большая поверхность электрода остаётся не задействованной. Здесь к тепловому потоку от горячего газа q_K^{II} добавляется энергия, подводимая путём переноса заряженных частиц от дугового пятна. Анализ эродированных следов на электроде совпадает с областью максимальных тепловых потоков. Тепловой поток в стенку области II состоит:

$$q^{II} = q_K^{II} + q_L^{II} + q_Z^{II}, \quad (7)$$

где q_L^{II} - лучистый поток, q_Z^{II} - поток от заряженных частиц.

Зона III. В пристенной области относительно холодная рабочая среда – водяной пар движется в направлении к зоне II, а в приосевой области уже нагретая плазмообразная рабочая среда движется в противоположном направлении электрода. Таким образом, тепловой поток в стенку области III состоит:

$$q^{III} = q_K^{III} + q_L^{III}. \quad (8)$$

где q_K^{III} - конвективный поток, q_L^{III} - лучистый поток.

В количественном отношении тепловой поток зоны I намного меньше зон II и III. В свою очередь в зоне II не наблюдается существенного повышения

теплового потока в стенку по сравнению с зоной III. Незначительное увеличение теплового потока в зоне II, по-видимому, происходит вследствие того, что определённая часть выделенного тепла уносится с продуктами разрушения электродов и часть её передаётся рабочему телу.

В результате многочисленных численных расчётов была получена наиболее рациональная конструкция составного электрода-анода (рисунок 7). На внешней поверхности второго слоя электрода-анода в наиболее нагруженной области нарезан канал трапецеидальной формы так, что верхние кромки данного канала соприкасаются с внешним корпусом плазмотрона, создавая при этом спиралевидный (змеевидный) канал в рубашке охлаждения. Такой конструктивный приём приводит к гарантированному завихрению и турбулизации охлаждающего потока, что в свою очередь приводит к многократному увеличению коэффициента теплоотдачи и, как следствие, к более интенсивному охлаждению термически нагруженного участка составного электрода. При этом в менее термически нагруженной области поток воды остаётся ламинарным и слабый отток тепла обеспечивает желаемый температурный диапазон. Данное конструктивное решение позволяет фиксировать требуемую температуру на рабочей поверхности электрода и тем самым снижать его удельную эрозию.

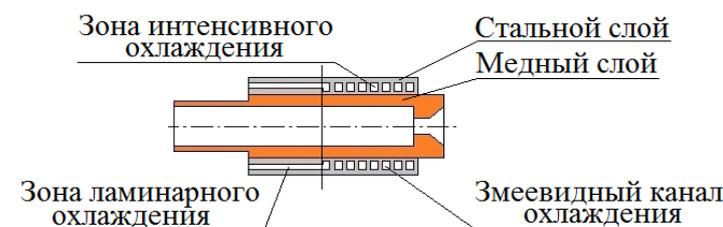


Рисунок 7 – Составной электрод - анод

Тепловая задача моделировалась и решалась в программном комплексе ANSYS. Математическая формулировка задачи: в заданной области исследования D (рисунок 8, а) требовалось определить функцию распределения температуры, удовлетворяющую уравнению теплопроводности

$$\operatorname{div}[\lambda(t)\operatorname{grad} t] = c(t)\rho \frac{dt}{d\tau} \quad (9)$$

и начальному условию

$$t|_{\tau=0} = 20^{\circ}\text{C}. \quad (10)$$

Краевые условия на различных границах следующие:

$$\lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_0; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = q_1 \text{ на } \Gamma_1; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_2; \quad (11-13)$$

$$\lambda \frac{dt}{dy} = \alpha_1(t - t') \text{ на } \Gamma_3; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = \alpha_2(t - t') \text{ на } \Gamma_4; \quad (14,15)$$

$$\lambda \frac{dt}{dx} = \alpha_2(t - t') \text{ на } \Gamma_5; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = \alpha_3(t - t') \text{ на } \Gamma_6; \quad (16,17)$$

$$\lambda \frac{dt}{dx} = \alpha_3(t - t') \text{ на } \Gamma_7; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_8; \quad (18,19)$$

$$\lambda \frac{dt}{dy} = 0 \text{ на } \Gamma_9; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_{10}; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = q_2 \text{ на } \Gamma_{11}; \quad (20-22)$$

$$\lambda \frac{dt}{dy} = q_2 \text{ на } \Gamma_{12}; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = q_3 \text{ на } \Gamma_{13}; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = q_4 \text{ на } \Gamma_{14}. \quad (23-25)$$

Здесь t – температура; λ – коэффициент теплопроводности; $c(t)$ – удельная теплоёмкость; ρ – плотность материала; q_1, q_2, q_3 и q_4 – тепловые потоки на границах $\Gamma_1, \Gamma_{12}, \Gamma_{13}$ и Γ_{14} ; α_1, α_2 и α_3 – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях охлаждения; t' и t'' – температура окружающего воздуха и охлаждающей воды.

Проведённый численный расчёт распределения температурного поля в стенке электрода в ПК ANSYS позволяет представить результат в графическом виде (рисунок 8, б), из которого видно, что на рабочей поверхности электрода удалось получить температуру в диапазоне 100÷150 °С в стационарном режиме, что необходимо для исключения конденсации.

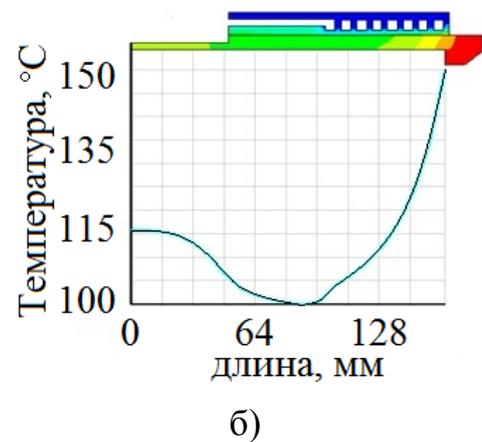
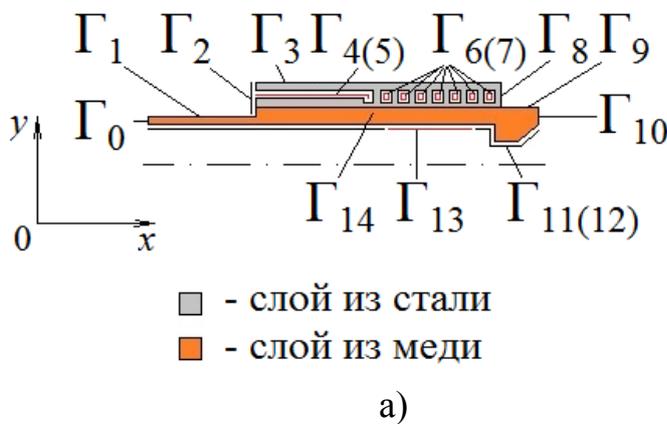


Рисунок 8 – Граничные условия а) и зависимость температурного распределения в электроде – аноде от его длины б)

К полученным электрическим характеристикам плазмотрона, прежде всего, относится вольт-амперная характеристика (ВАХ) дугового разряда (рисунок 9).

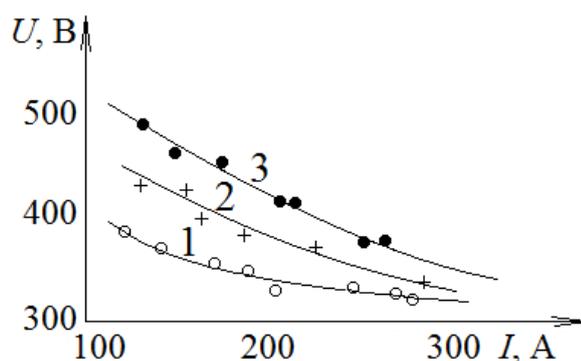


Рисунок 9 – Семейство вольт-амперных характеристик дуги в зависимости от расхода плазмообразующего газа:
 1 - $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 - $4 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3 - $5 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Полученные экспериментальные результаты обобщаются в критериальном виде следующим образом:

$$U = 2280 \cdot \left(\frac{I^2}{G_n d_2} \right)^{-0,17} \cdot \left(\frac{G_n}{d_2} \right)^{0,2} \cdot (p d_2)^{0,25}, \quad (26)$$

где p – давление внутри газоразрядной камеры.

Диапазон изменения определяющих параметров:

$$\frac{I^2}{G_n d_2} = 1,79 \cdot 10^8 \div 1,61 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{кг} \cdot \text{м}; \quad \frac{G_n}{d_2} = 0,161 \div 0,269 \text{ кг} / \text{м} \cdot \text{с}; \quad p d_2 = 20,4 \cdot 10^{-2}$$

Па·м. Погрешность расчетной формулы составляет менее 5%.

На рисунке 10 для сравнения приведены вольт-амперные характеристики дуги при работе плазмотрона на воздухе (кривая 1) и на водяном паре (кривая 2) при расходе плазмообразующего газа $4 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Сравнения следов выработки электродов при горении дуги на воздухе и на паре показало, что длина дуги при $I = const$ практически не меняется, поэтому повышение напряжения на дуге при переходе с воздуха на пар обусловлено только тем, что дуга горит в смеси водорода с кислородом. На чистом водороде напряжённость электрического поля, как известно, выше и составляет 30 В/см и более.

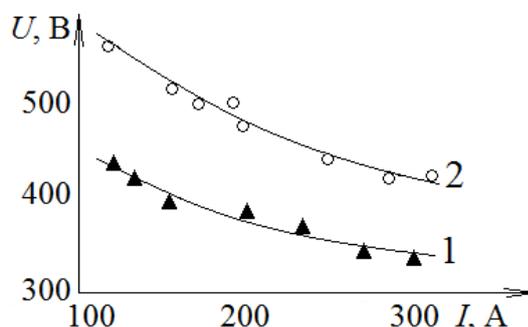


Рисунок 10 – Вольт-амперные характеристики дуги в зависимости от рода плазмообразующего газа

Проведённые эксперименты позволили доказать, что при переходе от воздуха к водяному пару с общим расходом плазмообразующего газа 4×10^{-3} кг/с напряжение на дуге возрастает уже при расходе пара $G_{\text{п}} = 0,6 \times 10^{-3}$ кг/с (рисунок 11). Далее напряжение на дуге с уменьшением расхода воздуха и увеличением расхода пара возрастает значительно медленнее (расход плазмообразующего газа оставался примерно постоянным). Повышение напряжения на дуге при переходе с воздуха на пар обусловлено тем, что дуга при работе на паре горит в смеси водорода с кислородом.

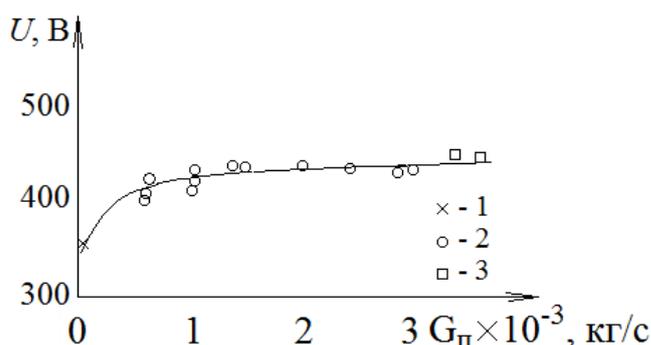


Рисунок 11 – Изменение напряжения на дуге при переходе от плазмообразующего воздуха 1 и паровоздушной среды 2 к водяному пару 3 при токе дуги около 200А

К энергетическим характеристикам плазмотрона относятся температура T и давление p плазмы на выходе из плазмотрона. Обобщающей энергетической характеристикой плазмы может выступать и энтальпия h нагреваемого газа (рисунок 12), которая также связана с температурой и давлением.

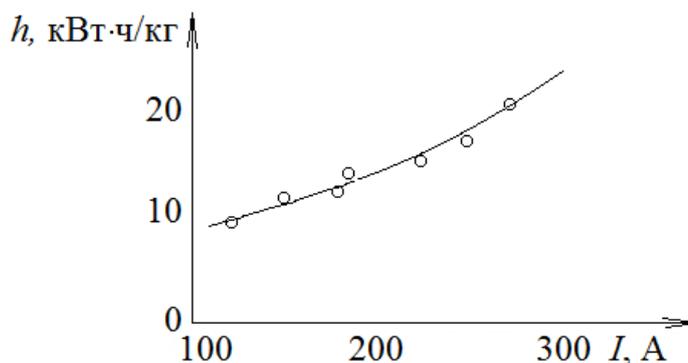


Рисунок 12 – Зависимость энтальпии плазменной струи от силы тока при расходе плазмообразующего газа – водяного пара 4×10^{-3} кг/с

Производительность плазмотрона характеризуется расходом газа G и тепловой мощностью струи плазмы $P_{\text{мен}}$:

$$P_{\text{мен}} = hG. \quad (27)$$

Проведённые эксперименты показали, что пропорционально росту мощности, вкладываемой в дугу плазмотрона, резко начинают расти тепловые потери на катоде и аноде. Однако это не сказывается на изменении КПД плазмотрона, который составляет $\approx 0,6 \div 0,7$ в косвенном режиме (дуговой разряд горит между электродами плазмотрона).

Ресурс работы основных элементов конструкции – катода и анода относится к эксплуатационным характеристикам. В электродуговых плазмотронах плотность тока в месте контакта плазмы с металлом достигает значительных величин, в результате чего удельные тепловые потоки в опорных пятнах дуги оказываются настолько большими, что происходит разрушение материала электродов. В нашем случае в ходе экспериментов степень эрозии электродов определялась методом взвешивания до и после испытаний. Для оценки эрозионных характеристик электродов был введён параметр \bar{G} – удельная эрозия электрода:

$$\bar{G} = \frac{\Delta m}{I \cdot t}, \quad (28)$$

где Δm – масса электрода, уносимая с плазменной струёй в процессе эксплуатации, кг; I – сила тока, А; t – время, с.

На рисунке 13 приведены экспериментальные данные по \bar{G} (при силе тока дуги $180 \div 200$ А) для анода (значения \bar{G} для катода располагаются несколько ниже – в диапазоне $10^{-9} \div 10^{-8}$ кг/Кл).

По результатам расчёта распределения температуры вдоль электрода-анода (рисунок 8, б) была изменена система охлаждения стальной обечайки за счёт её профилирования с целью достижения температуры рабочей поверхности $110 \div 130$ °С. Изменение системы охлаждения стальной обечайки за счёт её профилирования сказалось на величине \bar{G} (см. точку А, $\bar{G}_A = 1,7 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл). Отсюда следует, что при температуре входящего пара $250 \div 300$ °С необходимо обеспечить высокую скорость перемещения дугового пятна около 20 м/с (за счёт увеличения расхода пара или применения внешнего магнитного поля) и обеспечить за счёт косвенного охлаждения температуру рабочей поверхности электрода до температуры выше насыщенного пара на уровне $110 \div 130$ °С. Тогда будет возможно получение значений \bar{G} анода на уровне $10^{-10} \div 10^{-9}$ кг/Кл.

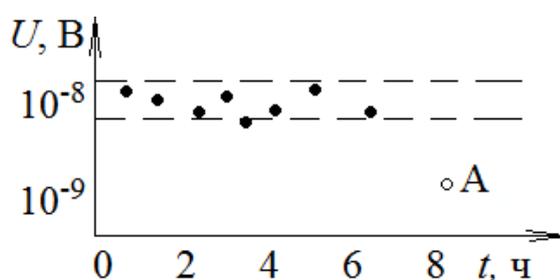


Рисунок 13 – Зависимость эрозии электрода - анода от времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана принципиально новая конструктивная схема пароводяного плазмотрона без термоэмиссионного катода и без применения дорогостоящих защитных газов для него (например, аргона или азота). Изготовлен и испытан опытный образец пароводяного плазмотрона данной конструкции. Определен регламент перехода от работы плазмотрона на воздухе к работе на паре и обратно. Диапазон мощности плазмотрона составляет $\sim 50 - 100$ кВт при токах $\sim 150 - 300$ А, падение напряжения на дуговом разряде $350 - 500$ В, расход пара $(2 - 5) \cdot 10^{-3}$ кг/с. Термический КПД плазмотрона с ростом массовой доли водяного пара и указанной мощности остаётся приблизительно постоянным и составляет $\sim 65\%$ в косвенном режиме. При постоянном суммарном массовом расходе водяного пара $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с плазмотрон может обеспечить теплосодержание плазмы \sim от 10 до 20 кВт·ч/кг, что позволит вести гибкое регулирование энерговклада в плазмохимические процессы. Экспериментально полученная величина удельной эрозии внутреннего электрода-анода составила $\sim 1,2 \cdot 10^{-8} \div 1,7 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл при среднем токе 200 А. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

2. Проведено исследование зависимости температурного распределения на рабочей поверхности внутреннего электрода-анода от различных конструкций самого электрода-анода. Установлено, что выполнение внешнего стального слоя электрода-анода в виде спиралевидного трапецеидального завихрителя приводит к наиболее рациональному режиму эксплуатации пароводяного плазмотрона, при котором в рабочей камере пароводяного плазмотрона исключается явление конденсации. Срок службы электродов пароводяного плазмотрона составляет около 300 часов.

3. Полученные экспериментальным путём энергетические, электрические и ресурсные характеристики разработанного пароводяного плазмотрона отвечают требованиям электротехнологии переработки техногенных отходов.

4. Проведено исследование высокотемпературных процессов воздушной и пароводяной газификаций в результате чего установлено, что для реализации экологически безопасной электротехнологии переработки техногенных отходов и получения высококалорийного синтез-газа необходимо использовать в качестве плазмообразующей среды водяной пар.

5. Разработанное техническое решение на конструктивное исполнение плазменной электропечи с комбинированным нагревом, позволяет выполнять переработку отходов со значительной экономией энергии по сравнению с традиционными плазменными электропечами без дополнительного нагрева.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах (издания из списка ВАК):

1. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик / С. И. Радько, Э. К. Урбах // Доклады

государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2012. – №1(25). – Ч.1. – С. 212-215;

2. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. Электродуговой плазматрон для нагрева водяного пара // Теплофизика и аэромеханика, 2012, т.19, №6, с. 761-763;

3. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. Генератор плазмы водяного пара для газификации твёрдых топлив. // Теплоэнергетика, 2013, №12, С.5–6;

4. Радько С.И. Тепловой расчёт составного трубчатого электрода в пароводяном плазматроне // Научный вестник НГТУ. – 2013. - № 4(53);

5. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. Электрические и тепловые характеристики генератора плазмы водяного пара с медными трубчатыми электродами / Известия вузов. Физика, 2014, №1/2, с. 44-47.

Список публикаций в других журналах, сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских научных конференций:

6. Energy characteristics of the arc plasmatrons at a change in geometry of a discharge chamber / А. С. Аньшаков, Е.К. Урбах, С. И. Радько и др. // Proceedings of the XVII Congress 21-25 may, 2012 St.Petersburg. - С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. - С. 138-144;

7. Plasma electric furnace for processing/utilization of carbon-bearing anthropogenic wastes / М.Г. Кузьмин, В. С. Чередниченко, С. И. Радько и др. // Proceedings of the XVII Congress 21-25 may, 2012 St.Petersburg. - С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. - С. 127-131;

8. Энергетические характеристики пароводяного плазматрона мощностью до 100 кВт / А. С. Аньшаков, Э.К. Урбах, С. И. Радько и др. // Наноматериалы и технологии. / Сб. тр. 4-й Всеросс. научной конф. с межд. участием. 28-30 августа 2012 г., г. Улан-Удэ. - Улан-Удэ : Изд-во БГУ, 2012.- С. 35-73;

9. Electric-arc steam heater with copper tubular electrodes / А. С. Аньшаков, Э.К. Урбах, С. И. Радько и др. // Contr. papers VIIth Int. Conf. "Plasma Physics and Plasma Technology" (Minsk, Belarus, Sept. 17 – 21, 2012). - Minsk: "Kovcheg", 2012. – vol. II. - pp.727–729;

10. Анализ некоторых типов конструкций составного электрода пароводяного плазматрона мощностью до 100 кВт / С. И. Радько, С. И. Творогов // Электроэнергетика : 8 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2013», Иваново, 23–25 апр. 2013 г. : материалы конф. В 7 т. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 2013. – Т. 3, ч. 2. – С. 9-12;

11. Optimal construction composite electrode steam plasmatorch / S. I. Radko, S. I. Tvorogov // The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 2. – P. 590-591;

12. Плазменная газификация техногенных отходов для получения тепловой и электрической энергии / А. С. Аньшаков, А. И. Алиферов, С. И.

Радько и др. // . - VI Евразийский Симпозиум "EURASTRENCOLD-2013", 24-29 июня 2013 г., г.Якутск / Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. - Якутск: Ин-т Физико-Технических проблем Севера им. В.П.Ларионова СО РАН, 2013. - Т.2. - С. 53-59;

13. Электрические и тепловые характеристики генератора плазмы водяного пара с медными трубчатыми электродами / Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. // XI Межд. конф. «Газоразрядная плазма и её применения» (г. Томск, 17-20 сентября 2013 г.). – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2013. – 4 с;

14. Генерация плазмы водяного пара в электродуговом плазмотроне / Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. / Сб. мат. Всерос. (с межд. участием) конф. “Физика низкотемпературной плазмы” (20-23 мая, г. Казань) т.1. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. – с.39-42.

Список патентов:

15. Электродуговой нагреватель водяного пара: пат. 2518171 Рос. Федерация: МПК H05B 7/18. А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев, С.И. Радько; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН). – 2012132796/07; заявл. 31.07.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60×84/16 объём 1,5 п.л. тираж 100 экз.
Заказ № 1348 подписано в печать 20.11.2014 г