

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

РАДЬКО
Сергей Иванович

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

Специальность: 05.09.10 –
Электротехнология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Аньшаков А.С.

Новосибирск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общая характеристика работы	4
ГЛАВА I. Анализ современного состояния проблемы	11
1.1 Низкотемпературная термическая плазма и области её применения.....	11
1.2 Свойства пароводяной плазмы	15
1.3 Схемы и конструкции действующих пароводяных плазмотронов.....	17
1.4 Высокотемпературные пароплазменные установки различного назначения	28
1.5 Заключение по главе	39
ГЛАВА II. Технология переработки и уничтожения техногенных отходов.....	41
2.1 Плазменная электропечь с пароводяным плазмотроном.....	41
2.2 Технологический процесс высокотемпературной переработки техногенных отходов	45
2.3 Энергетический расчёт зоны газификации.....	48
2.4 Заключение по главе	57
ГЛАВА III. Плазменная газификация углеродсодержащих техногенных отходов	58
3.1 Расчётно-теоретические методы исследования плазменно-энергетических процессов	59
3.2 Термодинамический анализ газификации на примере медиико-биологических отходов с помощью ПК АСТРА-4	63
3.3 Заключение по главе	70
ГЛАВА IV. Пароводяной плазмотрон и его характеристики.....	71
4.1 Пароводяной плазмотрон как электротехнологическая система	71
4.1.1 Электрическая подсистема.....	76
4.1.2 Газовая подсистема.....	82
4.1.2.1 Нагреватель воздуха	83
4.1.2.2 Парогенератор	86
4.1.3 Охлаждающая подсистема	91
4.1.4 Технологическая подсистема.....	92

4.2 Электрические характеристики	93
4.3 Энергетические характеристики.....	95
4.4 Эксплуатационные характеристики	98
4.4.1 Эрозия электродов.....	99
4.5 Численное моделирование распределения температурного поля в электроде – аноде в ПК ANSYS.....	105
4.6 Заключение по главе	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116

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 ($300\pm 50^{\circ}\text{C}$) и нагреватель воздуха, необходимый для питания плазмотрона подогретым воздухом на стадиях запуска и отключения ($150\pm 10^{\circ}\text{C}$).

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 получено положительное решение о выдаче патента 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 интересующие процессы с применением программного комплекса (ПК) ANSYS. Применялись методы планирования экспериментов, регрессионного анализа, оптимизации.

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 и было получено 1 положительное решение о выдаче патента 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.

ГЛАВА I. Анализ современного состояния проблемы

Глава посвящена общему обзору принципиальных схем и конструкций электродуговых генераторов пароводяной плазмы. В ней приведены сведения о достоинствах применения пароводяной плазмы по сравнению с остальными плазмообразующими газами. Отражены основные аспекты пароводяных плазмотронов, с которыми необходимо мириться при эксплуатации, а также выдвинут ряд требований, которые необходимо соблюдать для достижения стабильной работы плазмотрона. В данном разделе рассмотрены основные варианты использования пароплазменных источников энергии в технологиях высокотемпературной переработки и обезвреживания твердых бытовых, промышленных и медицинских отходов, сказано о применении пароводяных плазмотронов в процессах газификации угля. Обозначены недостатки действующих конструкций пароводяных плазмотронов и электротехнологических установок различного назначения, в состав которых входят эти плазмотроны, что позволило сформулировать задачи исследований настоящей работы.

1.1 Низкотемпературная термическая плазма и области её применения

Интерес к дуговой плазме водяного пара возник в 20-х годах прошлого века. В работе [1] сообщается об исследованиях Гердиена и Лотца, Меккера и Бурнхорна, посвященных измерениям напряженности электрического поля и температуры в столбе дуги, стабилизированной водяным вихрем. Из-за высокой температуры дугового разряда горение осуществлялось, по сути, в парах воды, диаметр водяной трубки практически соизмерим с диаметром столба дуги. Измеренные температура и напряженность поля составили $50 \cdot 10^3$ К и 300 В/см соответственно.

В нашей стране исследования пароводяных генераторов относятся к 60-м годам XX века. В работах [2, 3] приведены экспериментальные результаты по вольтамперным и эрозионным характеристикам плазмотронов с водяной и магнитной стабилизацией дуги. Показано, что эрозия электродов составляет

10^{-7} кг/Кл, а истекающая плазменная струя заметно загрязнена электродными материалами.

Поэтому следующим важным шагом для получения плазмы водяного пара стал переход к конструкциям плазмотронов со стабилизацией дугового разряда паровым вихрем. Усилиями Болотова А.В. с сотрудниками (Алма-Ата) и Алымова Б.Д. с сотрудниками (г. Днепропетровск) было положено начало исследованиям пароводяных генераторов плазмы для практического использования при бурении крепких горных пород и добыче руды в шахтах [4-8]. В результате проведенных исследований были установлены основные закономерности электрических характеристик от силы тока дуги, температуры и расхода водяного пара, а также КПД и удельная эрозия электродов. Например, показано, что при $G_{\text{п}} = \text{const}$ падение напряжения на дуге с увеличением температуры пара ($220\div 470^{\circ}\text{C}$) уменьшается. То же самое наблюдается в зависимости $\eta = f(T_{\text{п}})$ при $I = \text{const}$. Минимальная удельная эрозия электродов (10^{-4} г/Кл) получена при $T_{\text{п}} = 200\text{-}300^{\circ}\text{C}$.

Немного позднее к исследованиям пароводяных плазмотронов присоединился Михайлов Б.И. (Новосибирск) под руководством М.Ф. Жукова [9, 10]. Им получены основополагающие данные по электрическим, тепловым и эрозийным характеристикам, устойчивости горения дуги в паре и разработаны опытные образцы пароводяных плазмотронов различной мощности [11].

Низкотемпературная плазма – мощный интенсифицирующий фактор, резко ускоряющий протекание различных физико-химических процессов. Плазменная технология – отрасль, где интересы фундаментальной науки, прикладных исследований и производства переплетаются наиболее тесно. Такие свойства низкотемпературной плазмы как высокая температура, большая концентрация энергии в малом объёме, возможность нагрева практически любых газовых сред позволяют создавать уникальные аппараты и осуществлять процессы, не протекающие в обычных условиях. Использование генераторов термической плазмы – характерное явление для современного производства.

Прямое восстановление металлов из руд, получение ультрадисперсных порошков чистых металлов, карбидов, нитридов и материалов с заранее заданными свойствами, решение проблемы огнеупоров и хладостойкости металлов – вот далеко не полный перечень возможностей плазменной технологии и техники [12].

С развитием физики и техники электродуговой плазмы становится возможным осуществление технологических процессов с замкнутыми циклами, а это обеспечит решение глобальной проблемы, стоящей перед человечеством – снижение уровня загрязнённости окружающей среды.

Наиболее распространёнными генераторами низкотемпературной плазмы являются плазмотроны с электрической дугой в качестве нагревателя газов. Электрическая дуга обеспечивает эффективный нагрев практически любых газов до температур порядка $(3-10) \cdot 10^3$ К без каких-либо существенных ограничений по мощности и давлению.

Современное представление о возможности использования плазмотронов в промышленности основано на

- экономичности, то есть высоком электрическом и тепловом КПД;
- длительном ресурсе работы;
- надёжности и устойчивости работы электродуговой установки в целом;
- возможности создания установок больших мощностей;
- нагреве любых технологических необходимых газов: восстановительных, окислительных, инертных;
- простоте автоматизации процесса вследствие малой инерционности электрической дуги.

Разнообразие областей применения и требований к плазменной струе и генератору плазмы привело к большому разнообразию, как в организации рабочего процесса, так и в конструктивном оформлении плазмотронов. В настоящее время наибольшее распространение и применение получили электродуговые генераторы термической плазмы – электродуговые плазмотроны.

В зависимости от назначения и области применения различают следующие характерные виды плазмотронов [13]:

а) Плазменный инструмент – устройства (горелки) для сварки, резки, напыления тугоплавких материалов, бурения и поверхностной обработки твердых пород и т.п. Это устройства относительно небольшой и средней мощности, находящие все более широкое применение в различных видах производства. Уровень мощности от единиц до десятков киловатт [14].

б) Плазмохимические реакторы – для осуществления химических реакций в плазменной среде (например, пиролиз метана, получение окиси титана, восстановление чистых веществ из их окислов или хлоридов – урана, титана, германия, тантала и т.д.). Эти устройства обычно большой мощности и промышленного применения уровня от сотен до тысяч киловатт [15].

в) Металлургические плазмотроны – для переплава тугоплавких и особо чистых материалов, восстановления чистых материалов, рафинирования, получения монокристаллов и дисперсных материалов. Обычно это также промышленные установки средней и большой мощности [15].

г) Плазменные нагреватели в различных процессах – сжигания и переплава разных отходов, розжиг топок котлов и т.п., уровня мощности от десятков до сотен киловатт.

д) Генераторы плазмы научно-исследовательского назначения – для самого широкого круга исследований при высоких температурах и скоростях потоков, в частности, для изучения аэродинамических, теплофизических и других процессов. Плазмотроны этой группы имеют мощности от единиц киловатт до сотен киловатт [16, 17], и область применения плазмотронов и технологий на их основе расширяется.

При всём разнообразии назначений и форм электродуговых плазмотронов они содержат ряд общих функциональных элементов, определяющих их свойства, и соответствующие им технические решения, способы проектирования и применяемые материалы. В известной литературе, как правило, рассматривают принципиальные вопросы проектирования, для специалистов в данной области

техники, а вопросы конструирования плазмотрона, определяющие его работоспособность, надёжность и эффективность обычно не рассматриваются.

1.2 Свойства пароводяной плазмы

Вода как плазмообразующая среда занимает особое место среди остальных плазмообразующих веществ.

Во-первых, пароводяной плазме присуще такое свойство как высокая удельная теплоёмкость, что почти на порядок выше, чем у воздушной, азотной, кислородной и плазмы других газов, и уступает лишь водородной (рисунок 1.1) [11].

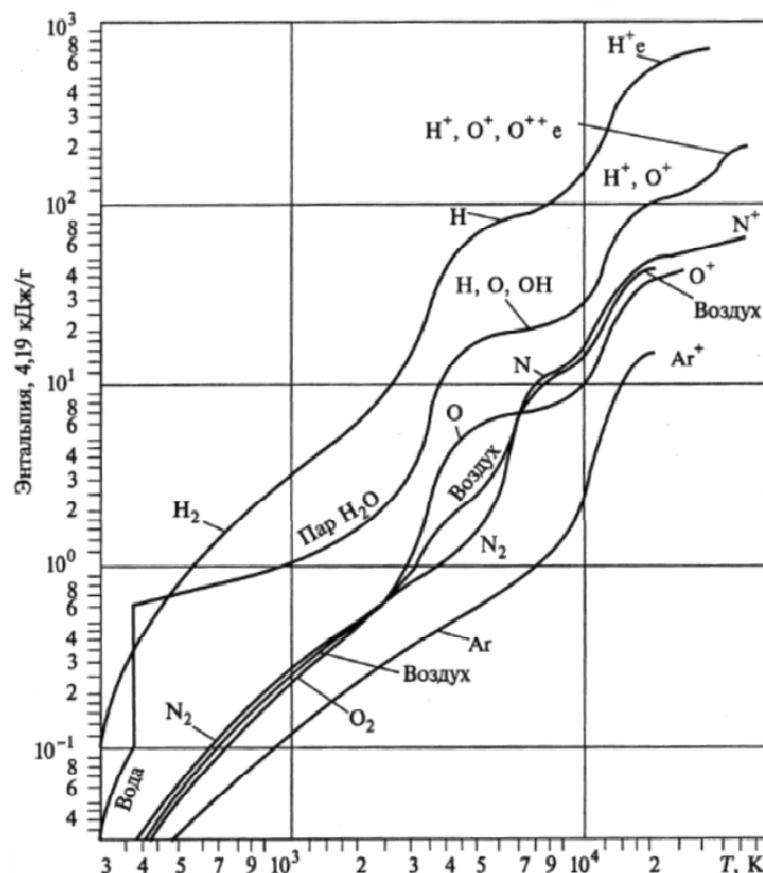


Рисунок 1.1 – Энтальпия различных плазмообразующих сред

На рисунке 1.2 представлены рассчитанные по формуле

$$Q = (T_k - T_0)C_V + r + (T - T_k)C_P \quad (1.1)$$

удельные энергозатраты на превращение 1 г воды, взятой при температуре T_0 , в сухой перегретый пар с температурой T °С. Эти значения в интервале давлений $(1 \div 10) \times 10^5$ с точностью до 2 % можно считать независящими от давления и составляющими величину порядка 3 кДж/г. Рабочее тело с такими аномально высокими теплофизическими характеристиками можно использовать для охлаждения стенок дуговой камеры и электродов плазмотрона.

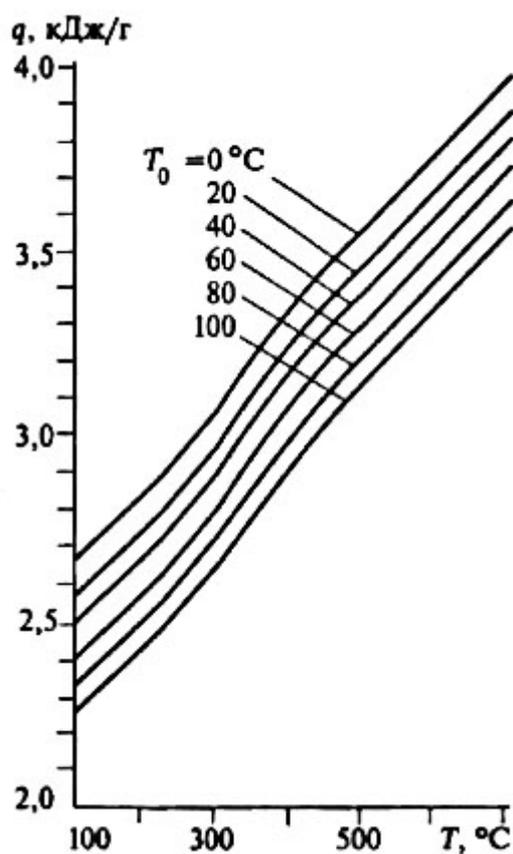


Рисунок 1.2 – Удельные энергозатраты на получение сухого перегретого пара

Во-вторых, поскольку пароводяная плазма – это смесь водородной плазмы с кислородной в соотношении 2 : 1, то её свойства ближе к свойствам водородной, так как в смеси его больше. В частности, теплопроводность пароводяной плазмы существенно выше, а вязкость значительно ниже, чем у других видов плазмы. Благодаря этому при горении дуги в вихревом потоке

пароводяной плазмы столб дуги подвержен не столь сильному боковому охлаждению, как в среде чистого водорода, но значительно более интенсивному, чем в среде других газов. Это в сочетании с большой удельной теплоёмкостью пароводяной плазмы приводит, во-первых, к большей напряжённости электрического поля в столбе дуги и, во-вторых, к большей энтальпии пароводяной плазмы при том же токе дуги.

В-третьих, особо следует отметить, что в пароводяной плазме отсутствует балласт, каким является азот в воздушной плазме (где его доля составляет около 78%). Для многих технологических процессов этот элемент инертен и, более того, вреден, так как служит источником токсичной окиси NO_x .

В-четвёртых, пароводяная плазма является не только теплоносителем, но и активным реагентом в физико-химических реакциях, что обеспечивает, например, полное извлечение углерода из материала отходов при газификации.

В-пятых, это её доступность. Исходным веществом для получения пароводяной плазмы служит обычная вода, отчего пароводяная плазма дешевле других сортов плазмы.

К числу проблемных вопросов, связанных с промышленным использованием пароводяных плазмотронов относятся каплеобразование на охлаждаемых поверхностях разрядной камеры и повышенная эрозия электродов [11]. Первая проблема приводит к неустойчивым режимам горения дугового разряда, а вторая ограничивает продолжительность непрерывной работы плазмотронов. Поэтому, несмотря на определённые успехи в создании технологических плазмотронов работающих на паре [18], низкий ресурс непрерывной работы таких плазмотронов и ограничение по мощности препятствуют их широкому использованию.

1.3 Схемы и конструкции действующих пароводяных плазмотронов

Специфика свойств водяного пара повлияла и на конструкции паровихревых плазмотронов [19, 20]. Во избежание конденсации пара стенку дуговой камеры можно подогреть, однако это приводит к дополнительным

осложнениям: во-первых, возрастает вероятность электрического пробоя между дугой и стенкой начального участка камеры, во-вторых, перегрев стенки выше температуры пара на входе в плазмотрон ведёт к потере устойчивости паровихревого потока, что ещё более увеличивает возможность пробоя дуги на стенку начального участка. Создавшая ситуация приводит к возникновению на начальном участке дуговой камеры явления «раннего шунтирования». При этом дуга укорачивается и в таком виде находится в пределах начального участка камеры. Естественно, что такие параметры плазмотрона, как напряжение, мощность, ресурс, энтальпия падают. По сути, описанный режим работы является аварийным. В обычных газовихревых плазмотронах, работающих на других видах газа, такой режим не обнаруживается, поскольку стенки начального участка дуговой камеры в этом случае всегда холодные.

Придание дуговой камере конфузорной формы повышает электрическую прочность промежутка между дугой и стенкой по всей длине начального участка, устраняя тем самым явление «раннего шунтирования». Выполнение проточной части плазмотрона в виде конфузора имеет и другие достоинства. С увеличением конфузорности за счёт возрастания в приосевой области радиального градиента давления существенно улучшаются осевая стабилизация столба дуги и фокусировка катодного пятна на термоэмиссионной вставке по сравнению с аналогичными характеристиками для цилиндрического канала [11].

На рисунке 1.3 схематично изображен однокамерный паровихревой плазмотрон с конфузорной формой разрядной камеры [11]. Катодный узел оснащается сменными катодами 1 с термохимическими вставками 2 из гафния. Анод 3 — медный, с конфузорным начальным участком и водоохлаждаемым рабочим участком — участком привязки дуги. Подача воздуха и пара в плазмотрон — отдельная, с помощью двухконтурной вихревой камеры 4. Это исключает конденсацию пара в потоке холодного воздуха при переходе с пускового воздушного режима на рабочий паровой. Сменный катод помещен внутри стакана 5, выполненного из нержавеющей стали. Обращенный к аноду торец стакана выполняет роль теплового экрана. Благодаря плохой

теплопроводности нержавеющей стали, он теплоизолирует пароплазменную среду в разрядной камере от холодной поверхности водоохлаждаемой медной обоймы катода и не допускает конденсации пара на ее стенках.

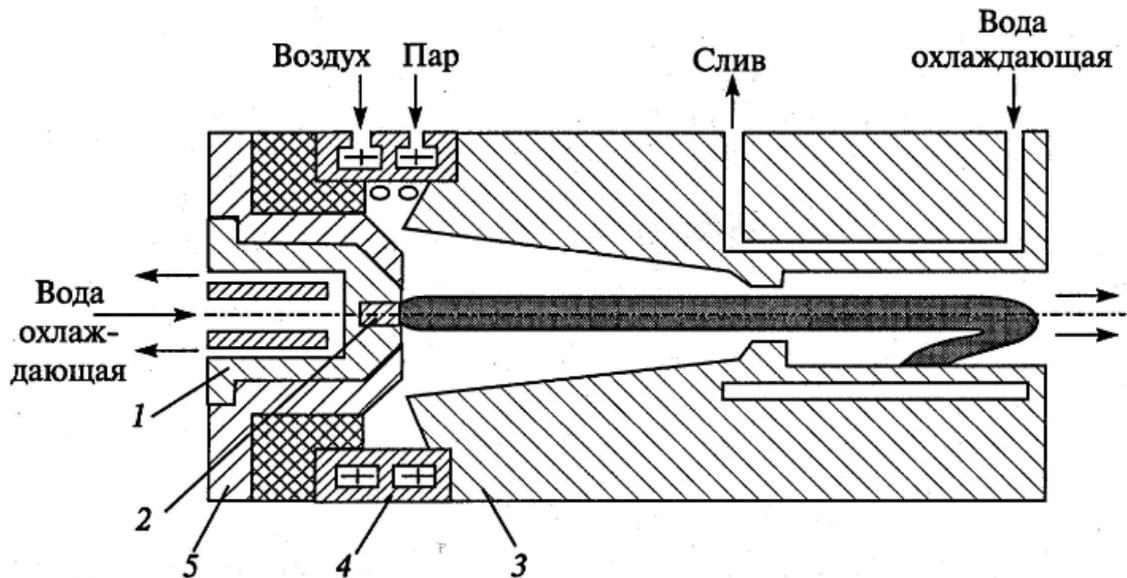


Рисунок 1.3 – Схема плазмотрона с паровихревой стабилизацией

На рисунке 1.4 представлена схема плазмотрона ЭДП-217 [11]. Катод состоит из обоймы 1 и впрессованной в неё вставки 2 из лантанированного вольфрама. Такой катод требует для защиты от окисления подачи в прикатодную область аргона или азота. Для формирования защитной газовой завесы плазмотрон оснащён разделительной диафрагмой 3 и дополнительной вихревой камерой 4, служащей одновременно рубашкой охлаждения диафрагмы. Пространство между катодом и диафрагмой образует форкамеру, куда из вихревой камеры 4 подаётся защитный газ, истекающий затем через центральное отверстие диафрагмы в основную разрядную камеру. Защитный газ аргон или азот, являющийся инертным по отношению к материалу катодной вставки 2, при своём движении в сторону анода 5 отесняет проникающий из основной разрядной камеры диссоциированный водяной пар от катода, защищая тем самым его от окисления.

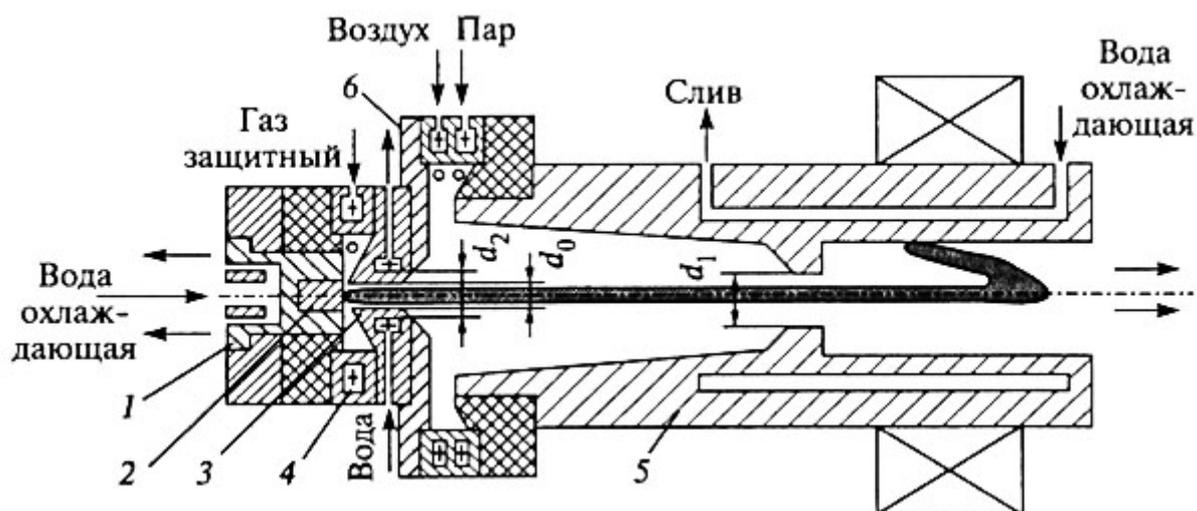


Рисунок 1.4 – Схема плазмотрона ЭДП-217

В институте теплофизики СО РАН под руководством М.Ф. Жукова разработан ряд паровихревых плазмотронов с газовой защитой катода [21-23]. Технические данные некоторых из этих плазмотронов приведены в таблице 1.1, а их вольтамперные характеристики – на рисунке 1.5 [11].

Таблица 1.1 – Технические характеристики плазмотронов

Параметры	ЭДП-166 ЭДП-215	ЭДП-217	ЭДП-211	ЭДП-201
Мощность, кВт	10 ÷ 70	60 ÷ 150	200 ÷ 500	400 ÷ 1000
Расход водяного пара, г/с	0,5 ÷ 3,0	1,0 ÷ 5,0	5,0 ÷ 30	10 ÷ 60
Максимальное значение силы тока дуги, А	250	500	800	800
КПД, %	50 ÷ 70	60 ÷ 70	60 ÷ 75	70 ÷ 80
Расход защитного газа (азота), г/с	-	0,5 ÷ 0,7	0,5 ÷ 1,0	0,5 ÷ 1,0
Ресурс катода, ч	30	100	100	100
Ресурс анода, ч	300	300	300	300
Масса, кг	1,25	12,5	42	82
Габариты, м	0,192×0,11×0,26	0,34×0,26×0,2	0,64×0,27×0,25	0,84×0,34×0,3

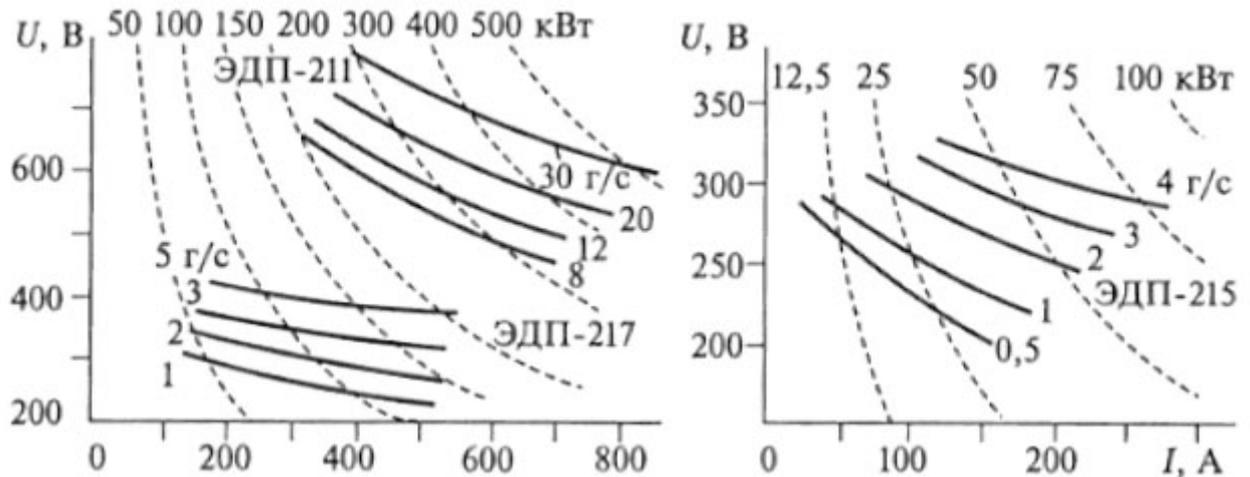


Рисунок 1.5 – Вольт-амперные характеристики дуги пароводяных плазмотронов ЭДП-217, ЭДП-211 и ЭДП-215

На рисунке 1.6 представлена конструкция плазмотрона ЭДП-145. Плазмотрон однокамерной схемы с паровихревой стабилизацией электрической дуги. Вольфрамовый катод защищается инертным газом. Во избежание конденсации пара водоохлаждаемая медная диафрагма теплоизолирована от электродуговой камеры специальным экраном. Проточная часть плазмотрона выполнена в виде конфузора ($\sim 3^\circ$ на сторону). Рабочая часть анода цилиндрическая. Аналогично данной конструкции разработаны пароводяные плазмотроны типа ЭДП-148 мощностью от 45 до 100 кВт и ЭДП-142 от 90 до 180 кВт. На рисунке цифрами обозначены: 1 – катод, 2 – анод, 3 – промежуточный электрод, 4 – межэлектродная вставка, 5 – соленоид.

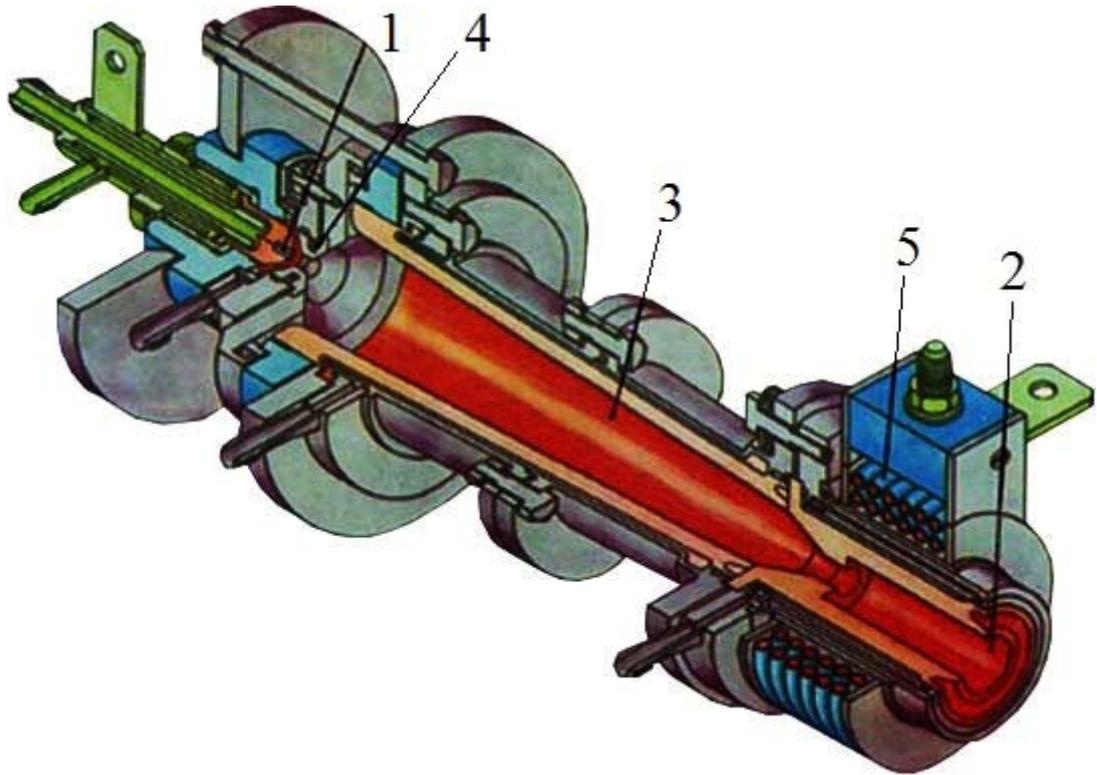


Рисунок 1.6 – Конструкция плазматрона ЭДП-145

На рисунке 1.7 приведены рабочие характеристики плазматрона ЭДП-145 ($G_P = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $G_{Ar} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с): вольт-амперные характеристики дуги и КПД.

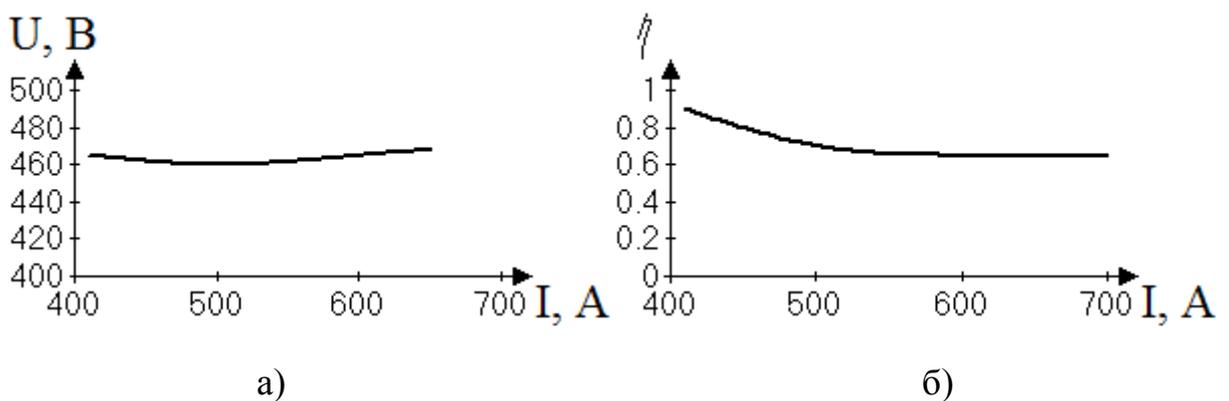


Рисунок 1.7 – Рабочие характеристики плазматрона ЭДП-145: а) – ВАХ дугового разряда; б) – КПД

Помимо плазматронов серии ЭДП в патентах [24-28] представлены ещё некоторые конструктивные решения плазматронов, которые также позволяют

получать низкотемпературную водяную плазму для применения её в химической, металлургической отраслях промышленности, в машиностроении и других производствах. Каждое техническое решение в представленных вариантах, по сути, направлено на увеличение мощности плазмотрона, стабилизации дуги, увеличения ресурса работы, КПД и температуры пароводяной плазмы на выходе из плазмотрона с учётом технологической специфики применения конкретного генератора низкотемпературной плазмы.

Как показано в [29-31], обычные вихревые камеры не всегда являются оптимальным конструктивным решением для закрутки газа в канале камеры, так как скорость вращения газа вдоль канала по мере удаления от точки вдува газа падает, вследствие чего ухудшаются теплоизоляция и термический КПД плазмотрона. Учитывая то, что инжектируемый газ, попадая внутрь канала и перемещаясь вдоль него, постепенно нагревается и теряет структуру закрученности, было принято решение подавать распределённый поток в разрядную камеру плазмотрона через стенку трубчатого медного канала, в котором имеются отверстия для тангенциального ввода газа. На рисунке 1.8 представлено устройство с цилиндрическим каналом и распределённой тангенциальной закачкой газа по нему. Здесь 1 – катод, 2 – анод, 3 – электрическая дуга, 4 – вихревая закрутка. При такой организации потока газа происходит поддержание положительного радиального градиента плотности внутри канала и улучшается стабильность вихря, но значительно уменьшается теплосодержание выходной струи, что и обуславливает его применение в качестве устройства для нагрева пара, а не как генератора низкотемпературной плазмы. Схематическое изображение распределения пара внутри камеры проиллюстрированы на рисунке 1.8 синими стрелками. Данный вариант плазмотрона-парогенератора был испытан лишь в лабораторных условиях.

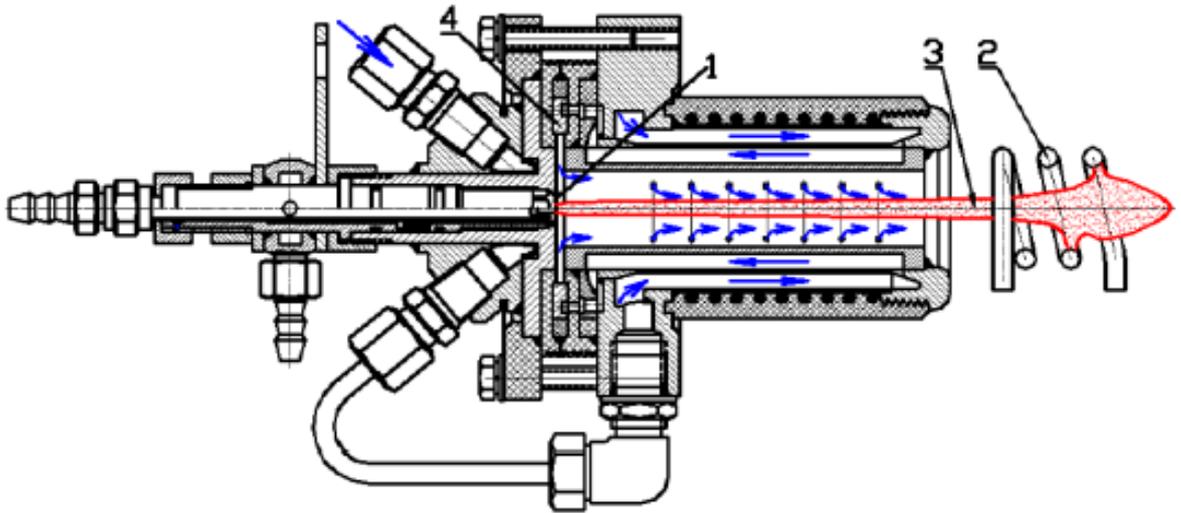


Рисунок 1.8 – Устройство для нагрева водяного пара

В работе [32] описан созданный в ИЭЭ РАН электродуговой трёхфазный пароводяной плазмотрон переменного тока с воздушной защитой медных электродов стержневого типа мощностью до 100 кВт. Схема работающего плазмотрона показана на рисунке 1.9. Использование воздуха в качестве защитного газа позволяет обеспечить высокий ресурс работы электродов при низких эксплуатационных затратах.

Диапазон мощности плазмотрона составляет $\sim 50 - 105$ кВт при токах $\sim 30 - 50$ А, падение напряжения $850 - 1750$ В, расход пара $2,6 - 5,8$ г/с, расход воздуха $1 - 3,8$ г/с, максимальное отношение расходов водяного пара к воздуху ~ 6 . Термический КПД плазмотрона с ростом массовой доли водяного пара в смеси и мощности остаётся приблизительно постоянным и составляет $\sim 95\%$, что значительно выше, чем у других существующих электродуговых генераторов пароводяной плазмы. При постоянном суммарном массовом расходе плазмообразующей смеси $\sim 6,55 - 6,8$ г/с с массовой долей водяного пара $\sim 55 - 85\%$ плазмотрон может обеспечить теплосодержание плазмы от $8,3$ до $12,5$ МДж/кг, что позволит организовать гибкое регулирование энерговклада в плазмохимических процессах. Среднемассовая температура плазмы $\sim 2950 - 3100$ К. Удельная эрозия электродов составила $6,5 \cdot 10^{-6}$ г/Кл при токе ~ 30 А, что позволяет, с учётом массы электродов, оценить величину ресурса их непрерывной

работы до 300 ч. Данный тип плазмотрона обладает потенциалом увеличения мощности до ~ 200 кВт и может рассматриваться как прототип, позволяющий перейти к созданию пароводяных плазмотронов переменного тока мощностью 1 МВт и более. На рисунке цифрами обозначены: 1 – корпус модуля подачи водяного пара; 2 – рубашка охлаждения; 3 – рубашка подогрева; 4 – зона ввода водяного пара; 5 – изолятор; 6 – зона ввода воздуха; 7 – узел со стержневым электродом; 8 – корпуса цилиндрических разрядных каналов электродных модулей.

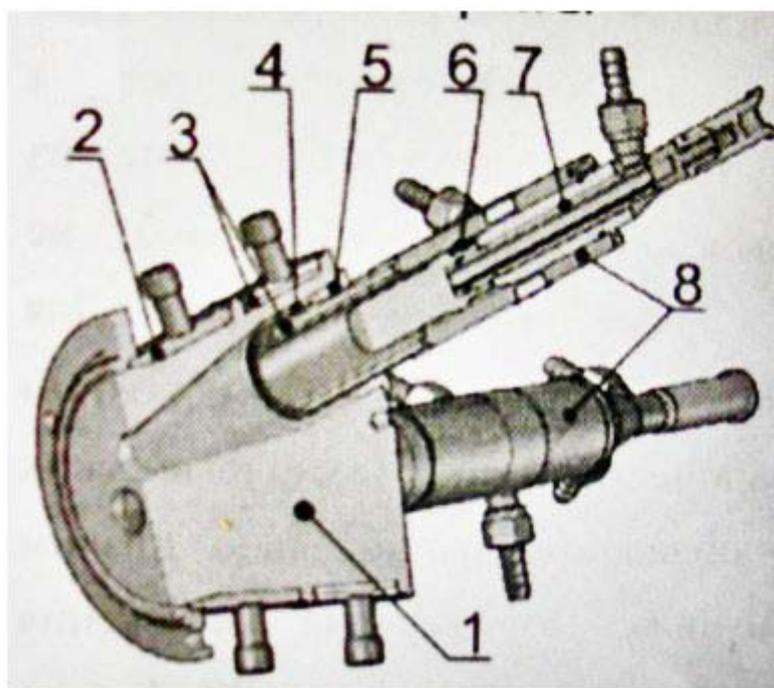


Рисунок 1.9 – Трёхфазный пароводяной плазмотрон переменного тока

В работе [33] предложено кардинальное решение проблемы ресурса дуговых плазмотронов. На рисунке 1.10 показана схема такого плазмотрона-реактора. Электрическая дуга привязана к поверхности расплавленного металла являющегося электродом. Такие электроды не подвержены эрозии и соответственно снимают ограничения на ресурс, мощность дуги и тип плазмообразующего газа. Устранение указанных ограничений открывает широкие возможности для промышленных применений плазмотрона, включая плазменную газификация угля и утилизацию токсичных отходов [34]. Применение

расплавленных электродов, как анода, так и катода, может приводить к особенностям и специфическим свойствам разряда. Поэтому дуга, реализованная в этом плазмотроне, представляет интерес, как новый физический объект, так и с прикладной точки зрения.

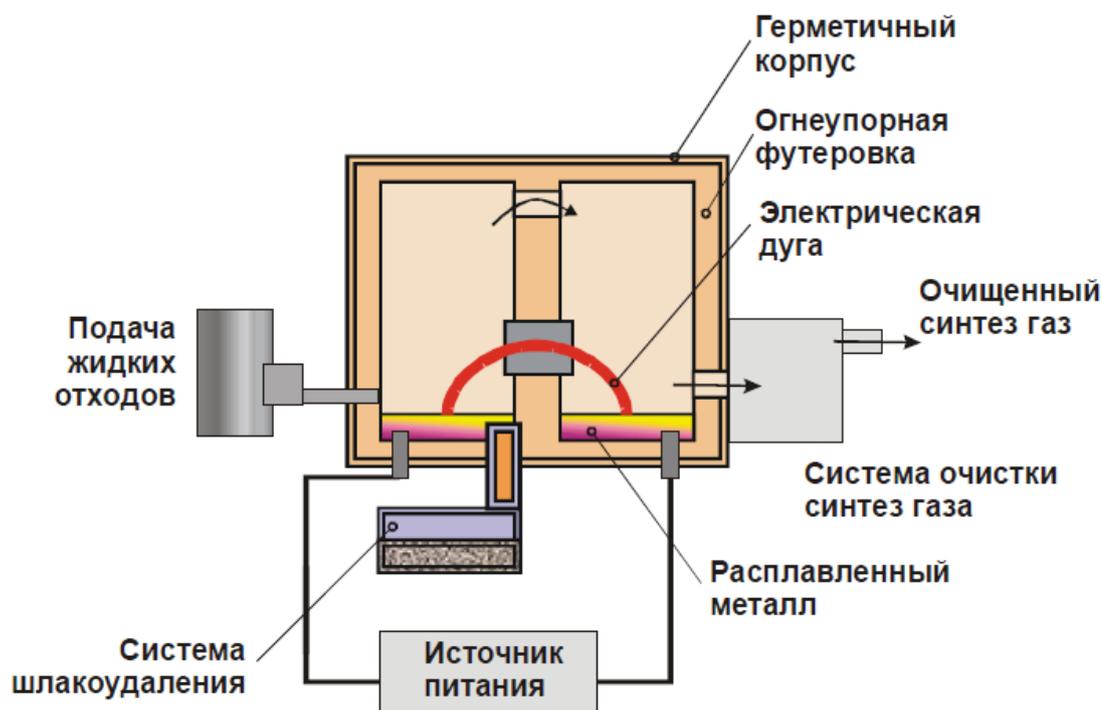


Рисунок 1.10 – Схема плазмотрона с расплавляемыми электродами

При работе на воздухе с одинаковыми расходами газа и геометрией разрядной камеры напряжение на дуге в полтора-два раза меньше, чем на более высокоэнтальпийном водяном паре. На базе экспериментальных данных получены обобщённые вольт-амперные характеристики (рисунок 1.11), которые могут использоваться для расчёта плазмотронов большой мощности. Характерными особенностями этих характеристик, по сравнению с аналогичными для традиционных плазмотронов с фиксированной длиной дуги, являются сильные зависимости напряжения на дуге от диаметра канала.

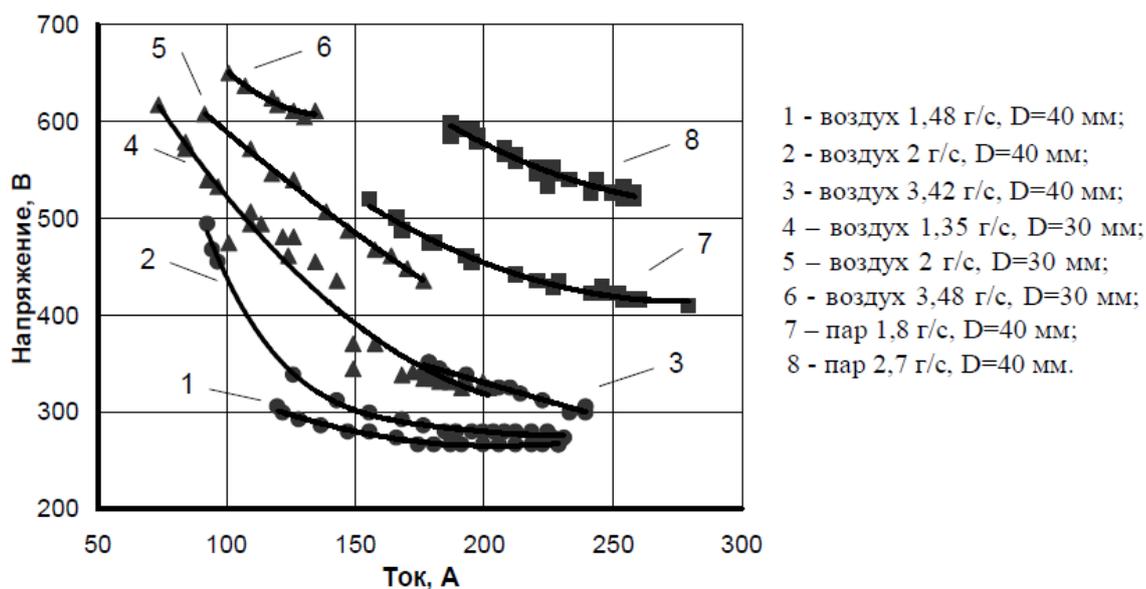


Рисунок 1.11 – ВАХ плазмотрона с жидкометаллическими электродами для различных расходов воздуха и пара

Результаты измерения тепловых потерь в водоохлаждаемой стенке канала показывают, что потери растут пропорционально мощности разряда. С увеличением расхода газа доля тепловых потерь сокращается. Наибольшая эффективность плазмотрона была получена при работе на паре, и достигла более 90 %.

К числу факторов, которые ограничивают применение плазменных технологий, относятся в первую очередь обычные для всех дуговых плазмотронов проблемы, связанные с относительно высокой стоимостью оборудования и ограниченным ресурсом работы электродов. Первый из них обусловлен в значительной степени стоимостью электротехнических устройств питания и стабилизации режимов работы плазмотрона, а второй – эрозией материала электродов, в первую очередь катода. В настоящее время разработаны различные методы повышения ресурса электродов, однако для плазмотронов, представляющих интерес в энерготехнологических применениях, время непрерывной их работы все еще составляет 300-500 часов.

1.4 Высокотемпературные пароплазменные установки различного назначения

Для получения альтернативных газовых топлив в настоящее время используются даже твердые бытовые отходы (ТБО), которые являются одним из видов углеродсодержащего сырья. Рост мировых цен на нефтепродукты обусловил интерес к наращиванию энергетического использования ТБО путем производства электрической и тепловой энергии. При этом принимается во внимание, что калорийность 1 т ТБО несколько выше калорийности 1 барреля нефти [35].

Современные методы утилизации и обезвреживания отходов базируются на высокотехнологических процессах их газификации с получением синтез-газа или на двухстадийном сжигании с использованием паровых, газовых, парогазовых турбин или газопоршневых двигателей для получения электроэнергии. При этом вторая высокотемпературная стадия гарантированно обеспечивает полное обезвреживание продуктов переработки от образования диоксинов и фуранов. Выбросы современных электростанций на сжигании ТБО в несколько раз меньше по объему и вредности, чем выбросы угольных ТЭС [35].

Большое число исследований проведено по применению пароводяной плазмы в процессах газификации угля и других видов твердого топлива [36-42]. Газификация угля основана на неполном его сжигании до монооксида углерода:



или на его пароводяной газификации:



Для последнего процесса (эндотермического) оптимальной является температура около 1000°C , которая должна поддерживаться за счет дополнительных источников энергии (например, термической плазмы). Получаемая по (1.2) газовая смесь имеет невысокую теплоту сгорания (до 4 МДж/м^3) вследствие значительного содержания балластного N_2 из атмосферного воздуха. Значительно более высокой является теплота сгорания синтез-газа

H_2+CO , получаемого по реакции (1.3), – до 11,1 МДж/м³. Этот продукт по содержанию H_2 является максимально приближенным к составу жидких углеводородов, чтобы получать СЖТ.

Плазменная газификация характеризуется тем, что тепло для проведения эндотермической реакции образования синтез-газа из углеродсодержащего сырья, например, согласно реакции (1.3), вводится в систему с плазмой (в данном случае – пароводяной), а не за счет сжигания части этого сырья.

К преимуществам этой технологии, как уже упоминалось, относятся:

а) отсутствие балластного азота в продуктах газификации, что повышает их теплотворную способность по сравнению с технологиями воздушной газификации, и близость элементного состава получаемого синтез-газа (в части содержания водорода) к составу жидких углеводородов;

б) обеспечение высоких параметров процесса газификации ($t = 1200^\circ\text{C}$ и выше) независимо от качества исходного сырья;

в) гарантированное обезвреживание продуктов газификации опасных отходов, когда время пребывания при $t = 1200^\circ\text{C}$ не менее 0,4 с.

Недостатком процесса (1.3) по сравнению с другими вариантами получения синтез-газа является его энергозатратность. Однако расчеты показывают, что этот процесс для конечного производства СЖТ становится экономически выгодным.

Отмеченные преимущества плазменных технологий делают их практически безальтернативными для уничтожения токсичных и опасных медицинских технологий [43-45].

В 2007 году Институт газа совместно с Институтом электросварки НАН Украины осуществил разработку технологии и оборудования для экологически чистой переработки опасных отходов с использованием плазмотронов согласно концепции [43,44]. Пароплазменное оборудование для переработки углеродсодержащих отходов включает реактор с механизмами загрузки отходов и выгрузки шлаков, плазменную установку с паровым плазмотроном и специализированным источником электропитания, систему охлаждения и очистки

отходящих газов, систему компьютерного управления и контроля, блок утилизации синтез-газа [35].

В последние годы в зарубежной и отечественной технической литературе появилось огромное количество публикаций в основном рекламного характера по использованию плазменных источников энергии в установках высокотемпературной переработки различных органических отходов. Рассмотрим основные варианты использования плазменных источников энергии в технологиях высокотемпературной переработки и обезвреживания твердых бытовых, промышленных и медицинских отходов с помощью термической плазмы [46].

В 1990-х гг. фирма MGC Moser-Glaser (Швейцария) разработала и внедрила в г. Мюттенц установку высокотемпературного обезвреживания опасных отходов мощностью 1 т/ч (рисунок 1.12). Технология получила название «Плазмокс» [47]. Центральным элементом установки является центрифуга с установленной в ней плазменной горелкой. Отходы в бочках подаются питателем в медленно вращающуюся водоохлаждаемую центрифугу, где распределяются на подине печи. Плазменная горелка постоянного тока мощностью 1,2 МВт нагревает материал и разрушает токсичные органические вещества. На поду образуется расплав минеральных компонентов с температурой около 1600 °С. Термическая деструкция органических компонентов осуществляется основной плазменной горелкой. Образующиеся газы через пережим, в котором устроена еще одна горячая зона, с помощью второй плазменной горелки мощностью 0,3 МВт поступают в окислительную камеру, где находятся в течение 2 с при 1200 °С.

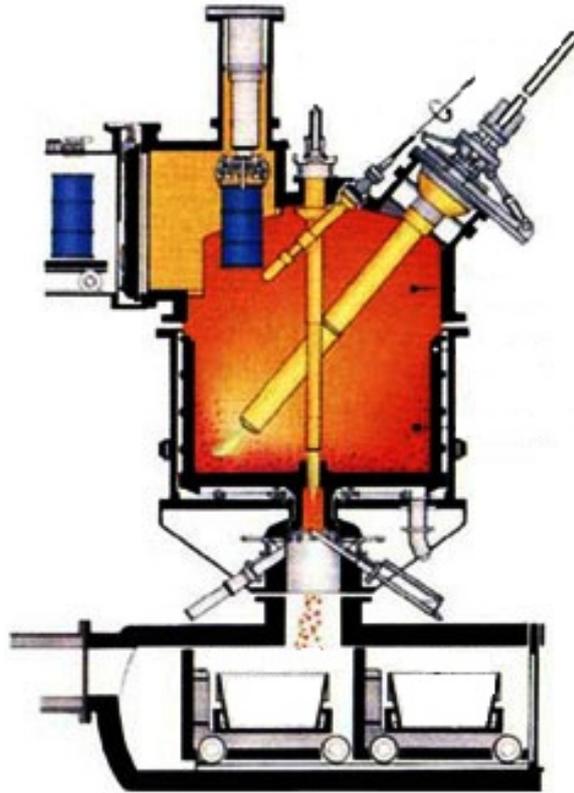


Рисунок 1.12 – Установка высокотемпературного обезвреживания опасных отходов

Вариантом без установки центрифуги является плавильная печь фирмы Europlasma (г. Бордо, Франция) для переработки токсичной золы МСЗ (рисунок 1.13). Мощность внедренных этой фирмой установок (во Франции, Японии и других странах) составляет от 6 до 41 т/сут. Нелетучие минеральные компоненты, в том числе соли тяжелых металлов, извлекаются из печи в виде расплава (вторичного продукта), а возгоны летучих веществ (кадмий, ртуть, свинец) после системы сорбции и улавливания собираются для последующей упаковки, утилизации или захоронения.

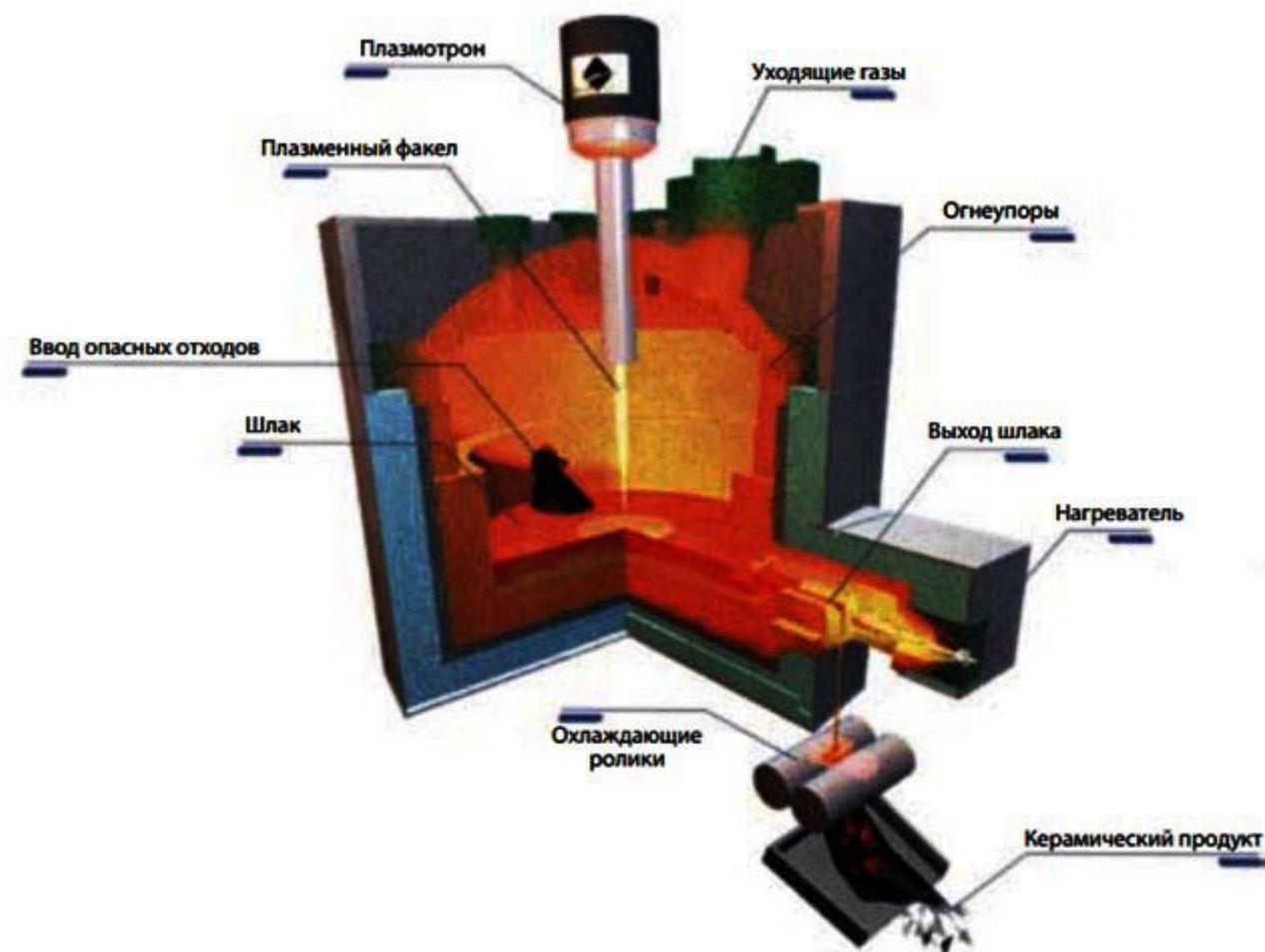


Рисунок 1.13 – Плазменная печь фирмы EUROPLASMA для переработки токсичной золы МСЗ

Специалистами Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова и ООО «Плазмактор» (г. Минск, Беларусь) разработана, изготовлена и испытана плазменная камерная печь периодического действия мощностью до 50 кВт и производительностью 20-30 кг/ч, показанная на рисунке 1.14 [48]. Печь предназначена для обезвреживания сравнительно небольших объемов медицинских и биологических отходов. После загрузки отходов в количестве примерно 10-15 кг и включения плазматрона цикл их переработки (сжигания) составляет примерно 10 мин и зависит от состава отходов. После завершения цикла работы плазматрон выключается, и печь переходит в режим остывания и разгрузки шлака. Суммарное время реализации всех стадий составляет около 30 мин, после чего печь готова к следующей загрузке и включению.

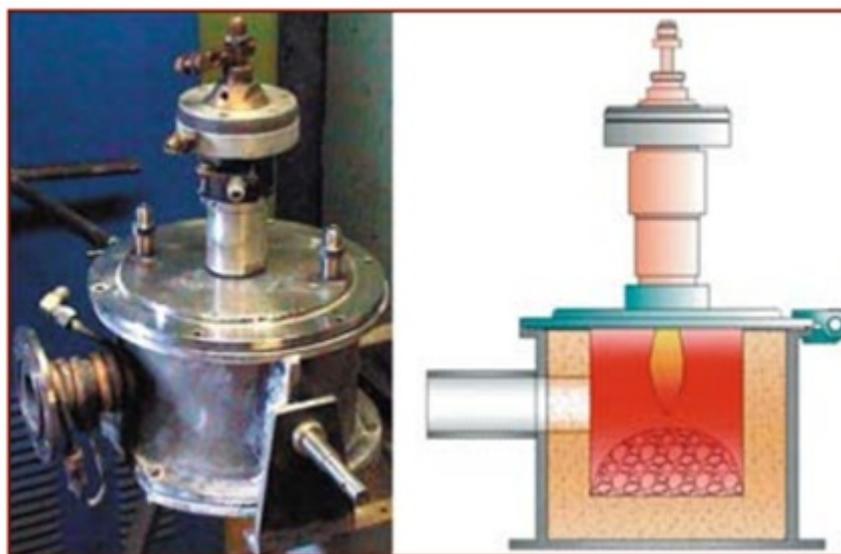


Рисунок 1.14 – Плазменная печь для обезвреживания медико-биологических отходов

Плазменная установка для переработки инфицированных медицинских отходов была разработана и спроектирована специалистами ЗАО «Плазма Тест» и построена на территории Московской городской инфекционной клинической больницы № 1 [49, 50]. Принципиальная технологическая схема установки приведена на рисунке 1.15. Основу оборудования составляет двухкамерная кессонная металлургическая печь с ванной расплава шлака и металла и плазмотроном на боковой стенке, обеспечивающим температурный уровень от 2000 до 5000 °С. Максимальная проектная пропускная способность по отходам - 60 кг/ч (500 т в год). По ряду технических и экономических факторов указанная установка не была введена в постоянную эксплуатацию.

В целом рассмотренная технология обработки неподвижного слоя токсичных отходов соударяющейся плазменной струей характеризуется низкой эффективностью тепло- и массообмена. Существенное усложнение установки за счет встроенной центрифуги для перемешивания расплава на подине печи кардинально не повышает эколого-технологические параметры процесса.

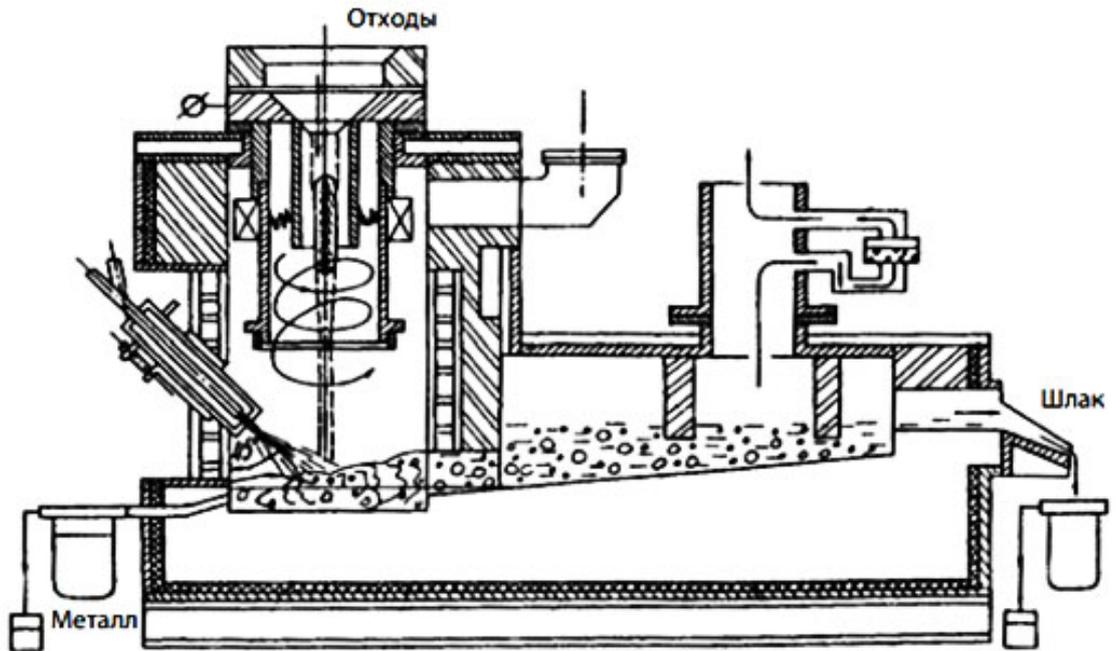


Рисунок 1.15 – Технологическая схема плазменной установки ЗАО «Плазма Тест» для обезвреживания медицинских отходов

Одной из наиболее эффективных разработок специалистов ГУП МосНПО «Радон» является технология плазменного сжигания твёрдых радиоактивных отходов (ТРО) низкого и среднего уровней активности. На предприятии создана и эксплуатируется установка «Плутон», обеспечивающая плазменную переработку отходов сложной морфологии с получением кондиционированного продукта в одну стадию и высоким коэффициентом сокращения объемов РАО. Стеклоподобный конечный продукт, плавленный шлак, пригоден для захоронения или длительного хранения на полигоне кондиционированных радиоактивных отходов. Устройство и вид шахтной печи плазменной установки «Плутон» приведены на рисунке 1.16 [51]. На рисунке 1.16 цифрами обозначены: 1 – узел загрузки, 2 – шахта, 3 – под, 4 – бокс приёма шлака, 5 – плазмотрон, 6 – узел слива шлака, 7 – выход пирогаза.

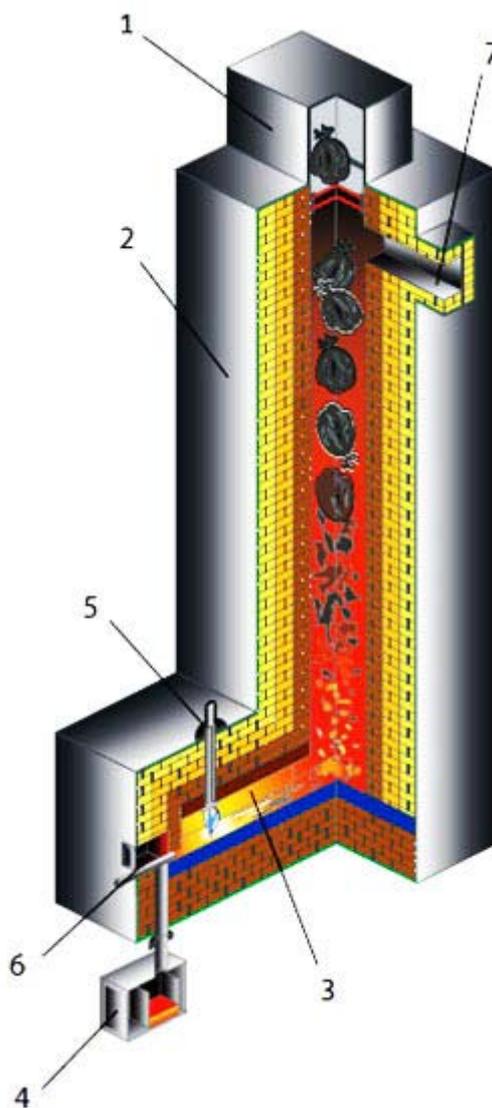


Рисунок 1.16 – Устройство и вид шахтной печи установки «Плутон»

Органическая часть радиоактивных отходов подвергается пиролизу в печи шахтного типа с производительностью 200-250 кг/час в условиях недостатка кислорода, в то время как процесс плавления шлака проводится в окислительной атмосфере, что способствует полному уничтожению органических компонентов шлака и получению более однородного продукта.

Нагрев плавителя шахтной печи до температур 1500- 1800°С возможен благодаря использованию дуговых плазмотронов постоянного тока, разработанных на ГУП МосНПО «Радон». Плавленный шлак (рисунок 1.17) представляет собой базальтоподобный монолит, где содержание оксида алюминия достигает 28% мас., оксида кремния – до 56% мас.; оксида натрия – от

2,5% мас. до 11% мас. В матрице шлака надежно фиксируются радиоактивные изотопы, а также оксиды тяжелых металлов, таких как свинец, никель, медь, цинк и т.д.



Рисунок 1.17 – Шлак в приемных контейнерах

Плотность шлака составляет 2,5-3,5 г/см³. Он является чрезвычайно устойчивым к химическому воздействию материалом. Скорость выщелачивания из шлака в воду натрия, одного из самых «подвижных» элементов, в среднем на порядок ниже подобного показателя для боросиликатных стекол и на два-три порядка ниже, чем у цементных матриц. Скорость выщелачивания большинства других элементов, в том числе тяжелых металлов, еще ниже, поэтому подобный шлаковый компаунд можно рассматривать как одно из самых совершенных средств консервации радиоактивных элементов и неорганических токсикантов. Приемные контейнеры со шлаковым компаундом загружаются в невозвратные защитно-транспортные контейнеры и размещаются на полигоне долговременного хранения кондиционированных форм РАО в Научно-производственном комплексе ГУП МосНПО «Радон».

ГУП МосНПО «Радон» получил разрешение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ на переработку

твердых радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности плазменным методом в 2007 году, и с 2008 года на установке «Плутон» ведется плановая переработка ТРО.

На переработку принимаются твердые радиоактивные отходы смешанного типа, близкие по морфологическому составу ТРО атомных электростанций. Наряду с горючими материалами (бумагой, древесиной, текстилем, кожей, полимерами) перерабатываемые отходы включают до 30-40% негорючих компонентов (строительного мусора, стекла, грунта, ила, металлического скрапа, теплоизоляционных материалов и т.д.). Суммарная влажность отходов может достигать 40% при влажности содержимого отдельных упаковок до 90%. Удельная активность ТРО, принимаемых на термическую переработку, ограничивается, согласно условиям действия лицензии, значениями $2,2 \cdot 10^5$ Бк/кг по α -излучающим радионуклидам и $3,7 \cdot 10^6$ Бк/кг по β -излучающим радионуклидам.

В 2009-2011 годах плазменным методом в шахтной печи установки «Плутон» были переработаны такие «неудобные» для других высокотемпературных технологий отходы, как активированный уголь, неорганические сорбенты и донные отложения (илы), выгруженные из аппаратов очистки ЖРО и сборников стоков системы спецканализации. Эти виды отходов характеризуются высоким содержанием влаги (до 90%), в сухом остатке илов доля органических веществ достигала 50%.

Плазменным методом успешно перерабатываются ранее подпрессованные смешанные отходы после извлечения из тары и переупаковки в крафт-мешки, а также отходы, подвергшиеся суперкомпактированию в металлической упаковке. Проблема переработки перечисленных выше видов радиоактивных отходов весьма актуальна для атомных электростанций. Плазменная технология способна в значительной степени снизить ее остроту.

Схема плазмохимического реактора с жидкометаллическими электродами показана на рисунке 1.10 [33,34]. Внутри стального герметичного корпуса, футерованного огнеупорным кирпичом, находятся две реакционные камеры со

специальными ваннами. Перед первым стартом плазмохимического реактора в ванны загружается металлический лом. Электрическая дуга зажигается между этими ваннами через специальный водоохлаждаемый канал. Отходы подаются на поверхность расплавленного металла. Плазмохимическая реакция газификации протекает в камерах реактора при температуре 1300-1500°C. Продукты газификации выводятся из камер плазмохимического реактора и поступают в систему газоочистки. Во время работы на поверхности металла образуется слой расплавленного шлака. Шлак должен удаляться по мере накопления или непрерывно для установок большой производительности с помощью специального устройства шлакоудаления. Фотография реактора с плазмотроном мощностью 500 кВт показана на рисунке 1.18.



Рисунок 1.18 – Плазмохимический реактор для утилизации токсичных отходов мощностью 500 кВт

По сравнению с плазмохимическими реакторами, использующими традиционные плазмотроны, данный реактор обладает стратегическими преимуществами:

- 1) полное отсутствие эрозии электродов;
- 2) возможность использования водяного пара в качестве плазмообразующего газа.

Для демонстрации практических возможностей реактора с жидкометаллическими электродами были проведены исследования различных плазмохимических реакций, в том числе исследован процесс паровой газификации угля и процесс утилизации токсичных отходов, включая хлорсодержащее трансформаторное масло ТХД. Масло ТХД подавалось в реактор на поверхность расплавленного металла. Плазмохимическая реакция газификации протекала в камерах реактора при температуре 1300-1500 °С. В результате реакции газификации, взаимодействия пара с ТХД образуются синтез газ (смесь водорода, СО и HCl). Полученный синтез газ подвергается быстрому охлаждению (закалке), одновременно проходя очистку от HCl в центробежно-барботажном аппарате.

Результаты анализов показывают, что концентрация диоксинов/фуранов в продуктах разложения ниже нового европейского стандарта TEQ = 0,1 г/м³. Таким образом, разработанный плазмохимический реактор может использоваться как основа для создания технологической базы переработки токсичных отходов.

1.5 Заключение по главе

Приведён литературный обзор электродуговых пароводяных плазмотронов. Практически все они являются плазмотронами постоянного тока. Эта ситуация обусловлена тем фактором, что дуга постоянного тока горит более устойчиво по сравнению с дугой переменного тока. В большинстве из представленных плазмотронов используются катоды из тугоплавких материалов, в основном из сплавов на основе вольфрама, а также циркония и гафния, не выдерживающих работы в окислительных средах. Для защиты катодов в большинстве случаев применяются инертные газы, в основном аргон, что делает эксплуатацию таких плазмотронов в непрерывных технологических процессах дорогостоящей.

Дополнительно к числу факторов, которые ограничивают применение плазменных технологий, относятся в первую очередь обычные для всех дуговых плазмотронов проблемы, связанные с относительно высокой стоимостью оборудования и ограниченным ресурсом работы электродов, из чего сделан вывод и поставлена цель настоящей работы – необходимо разработать надёжный и простой в эксплуатации плазмотрон, использующий в качестве плазмообразующего газа только водяной пар (без применения дополнительных защитных газов) и чтобы удельная эрозия его электродов была менее 10^{-9} кг/Кл.

В главе приведён обзор высокотемпературных установок, разработанных как в нашей стране, так и за рубежом. Однако, широкое практическое распространение высокотемпературных плазменных установок различного назначения сдерживается в связи с обозначенными проблемами, а именно отсутствием надёжных дуговых плазмотронов с достаточным ресурсом непрерывной работы.

ГЛАВА II. Технология переработки и уничтожения техногенных отходов

Данная глава имеет цель дать описание технологии, предназначенной для высокотемпературной переработки и уничтожения углеродсодержащих техногенных опасных отходов, в которой в качестве основного технологического элемента будет задействован разработанный пароводяной плазмотрон. Приведена электрическая схема замещения зоны газификации реактора. Представлен демонстрационный расчёт теплового энергетического баланса установки с условно выбранными геометрическими параметрами и исходными составами отходов и шлака.

2.1 Плазменная электропечь с пароводяным плазмотроном

На рисунке 2.1 изображена схема плазменной электропечи с пароводяным плазмотроном, которая предназначена для высокотемпературной переработки техногенных отходов. Она не предъявляет жестких требований к влажности исходного сырья в процессе предварительной подготовки, морфологическому и химическому составам, а также агрегатному состоянию. Отходы 1 поступают через узел загрузки 11 в футерованную печь 10, где под действием энергии плазмотрона 12.2, дуги на графитированном электроде 12.1 и омического тепла шлака 21 газифицируются и вырабатываемый синтез-газ поступает в аппарат очистки и закалки 14, 15 – вихревой скруббер. Очищенный синтез-газ из бака отстойника 6 подается в камеру сжигания 18 с помощью воздуходувки 17. В камеру сжигания (дожигатель) одновременно подается необходимое количество воздуха 4 для сжигания синтез-газа. Отбор синтез-газа для определения его химического состава 20 осуществляется перед камерой сжигания. Образовавшийся при плазменной газификации шлак 7 удаляется из шлакосборника 13. Шлам 8 удаляется периодически из шлакоприемника 16. Водяной насос подает воду из бака отстойника в аппарат очистки и закалки. В баке-отстойнике предусмотрен специальный теплообменник для охлаждения поступающей из вихревого скруббера 15 воды. Система питания 19 обеспечивает

подачу электрической энергии 2, плазмообразующего газа 3 и воды 4 на плазмотроны. Продукты сгорания синтез-газа после камеры сжигания частично отбираются для химического анализа. В объеме печи поддерживается разряжение 10 – 15 мм вод. ст.

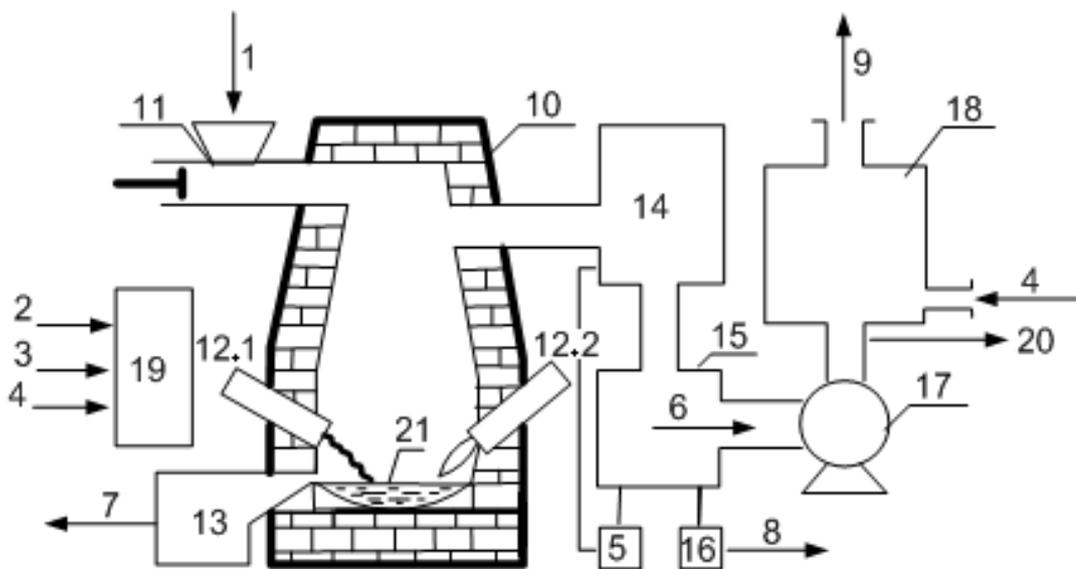


Рисунок 2.1 – Схема плазменной электропечи

Получаемый в электротехнологии газовый продукт состоит на 90 - 92% из смеси монооксида углерода ($\approx 40\%$ CO) и водорода ($\approx 50\%$). Синтез-газ может сжигаться для получения тепловой энергии в стандартных котлах или аппаратах с кипящим слоем катализатора. Однако наиболее перспективным является использование смеси CO и H_2 в качестве химического сырья. Эти технологии использования синтез-газа обеспечивают малоотходность переработки бытовых и промышленных отходов и повышают уровень ресурсосберегающего фактора. Получаемая в качестве дополнительного продукта шлако-металлическая смесь имеет инертные свойства при взаимодействии с окружающей средой и может использоваться для дорожного строительства, получения вспененного гранулянта, шлаковаты, литых изделий широкого назначения. Свойства и состав получаемого шлака могут изменяться за счет введения в рабочее пространство печи дополнительно флюсов в виде SiO_2 , CaO и др.

Схема плазменной электропечи на рисунке 2.1 отличается от схемы плазменной электропечи приведённой в [52] отсутствием подового электрода и наличием графитированного электрода 12.1.

Принятая электротехнологическая схема исключает возможность интенсивного образования вредных соединений, в том числе оксидов азота, за счет отказа от использования воздуха в качестве окислителя. Это техническое решение по теоретическим расчётам даёт возможность в 2 - 3 раза снизить массу получаемых газов не только за счет исключения транспортного азота, но и за счет разделения в пространстве и времени проведения процессов полного окисления углерода для получения тепловой энергии. Предлагаемая высокотемпературная электротехнология может включать в себя устройства для интенсивной закалки получаемого синтез-газа с последующим проведением грубой и тонкой очистки газовых потоков от вредных составляющих.

В предлагаемой технологии в реакторе газификатора имеется ванна с жидким шлаком и металлом на дне и система их удаления в жидком виде. Такая система типична в металлургии и давно известна в энергетике, однако в установках для уничтожения вредных отходов она начала применяться относительно недавно и непрерывно совершенствуется [53].

Органическая составляющая отходов (в том числе биологическая – токсичная) и сложные неорганические соединения в основном разлагаются за счёт действия высоких температур, потоков термической радиации и воздействия активных компонент, появляющихся в рабочем пространстве. Негорючая компонента отходов частично превращается в пыль и газ и удаляется из рабочей камеры вместе с основным потоком отходящих газов, а частично – переходит в шлаковую ванну. Жидкий шлак действует и как растворитель для нереагирующей части отходов, и как катализатор некоторых реакций разложения. Металлическая компонента уничтожаемых отходов частично выгорает и уносится с отходящими газами в виде, частично окисляется и переходит в шлак, а крупные куски большей частью тонут в шлаковой ванне и расплавляются на её дне.

Условие, что отходы (например, медицинские) должны находиться в закрытом, упакованном виде, определяет периодический режим поступления упаковок на уничтожение. Соответственно этому режим работы обычных инцинераторов не может быть вполне равномерным. Дополнительную неравномерность режима работы вносит нерегулярность (разнообразие) состава отходов в упаковках. В результате чего может оказаться, что какая-то небольшая часть сложных органических и неорганических веществ, в том числе биологически вредных (а также часть простых горючих газов), не успеют разложиться и сгореть в первичной рабочей камере инцинератора и будут унесены газовым потоком. Это происходит постоянно в примитивных мусоросжигательных печах, работающих без газоочистных устройств. Установка с жидкой металлической ванной на дне лишена данного недостатка.

Количество твёрдых остатков, образующихся при переработке например медицинских отходов, составляет около 20-25% [53]. Из этого количества 5-8% уносится из камеры сжигания в виде пыли, до 15-20% остаётся в виде шлака, а 2-3% - в виде жидкого металла на дне ванны рабочей камеры. Жидкий шлак из ванны в рабочей камере плазменного модуля самостоятельно вытекает по наклонной трубе в наружный шлакоуловитель: в бак-гранулятор или в воду. Мелкая фракция уносится в систему гидрозолоудаления. Крупная фракция гранулята удаляется периодически в наружный накопитель.

Шлам – сложная смесь оксидов, солей и щелочей – после кристаллизатора в составе газопромывочной системы может быть переработан в индивидуальные вещества или возвращён в рабочую камеру для переплава в шлак.

Жидкий металл со дна ванны рабочей камеры будет сливаться периодически через донное отверстие по мере накопления в специальную изложницу достаточного объёма. Металл будет представлять собой очень сложный сплав, часть которого можно использовать в металлургических отраслях.

2.2 Технологический процесс высокотемпературной переработки техногенных отходов

Первым периодом плавки является расплавление металлической шихты. Графитированный электрод опускают до касания его с шихтой, а плазмотрон включают в режиме косвенного действия, когда дуга горит между анодом и катодом плазмотрона (рисунок 2.2). Исходящая струя плазмы начинает оплавливать верхние слои шихты и разогревать графитный электрод.

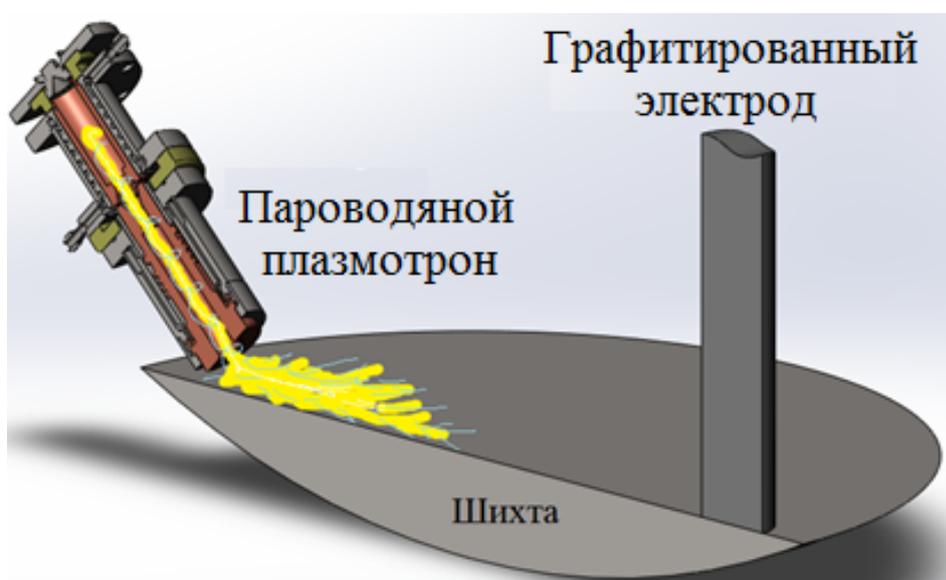


Рисунок 2.2 – Зона газификации реактора (в разрезе)

После определённого времени работы плазмотрона в косвенном режиме, его переводят в режим прямого действия, когда дуга замыкается на переплавляемую шихту, а графитированный электрод начинают приподнимать, образуя второй дуговой разряд между ним самим и переплавляемой шихтой. Металл под электродом и плазмотроном нагревается, начинает плавиться и каплями стекать на дно ванны. В шихте под электродом и плазмотроном образуются выемки, а затем «колодцы», в которые по мере их проплавления опускаются электрод и плазмотрон. Этот процесс длится, пока электрод с плазмотроном не дойдут до лужи расплавленного металла на подине; затем шихта стенок колодцев начинает подплавляться, колодцы расширяются, уровень

расплавленного металла в ванне, а с ним и электрод с плазмотроном начинают подниматься, пока вся шихта не расплавится [54]. Это очень беспокойный, неустойчивый период плавки, так как окружённая холодной шихтой дуга на электроде очень короткая и неустойчивая, подплавляемые дугой стенки колодцев обрушиваются, падают на электрод и плазмотрон, вызывая короткие замыкания. В то же время период расплавления желательно провести как можно быстрее на максимальной мощности, так как от времени расплавления зависит производительность всей установки и её КПД. Этот период можно проводить на максимальном напряжении, так как дуги окружены холодным металлом, защищающим футеровку стен и свода от их излучения (рисунок 2.3).

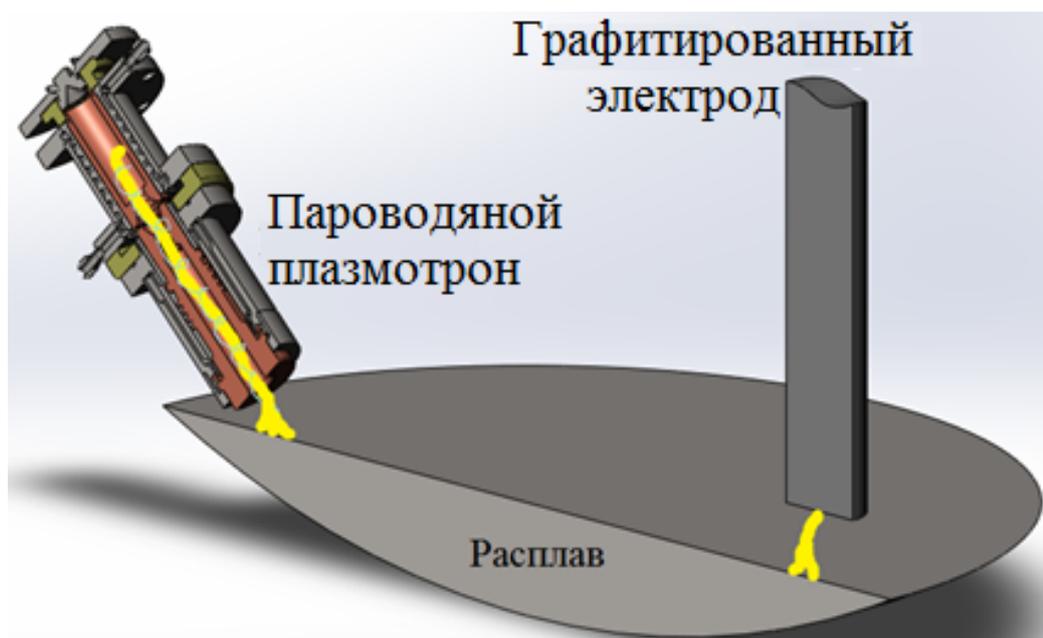


Рисунок 2.3 – Зона газификации реактора (в разрезе)

В период, когда металл расплавлен, происходит загрузка отходов в печь, после чего сразу начинается процесс газификации. Отходы, как уже было упомянуто выше, поступают в упакованном виде. При высокой температуре (около 1600 °С) в камере газификатора в результате интенсивного разложения горючих составляющих образуются: коксовый остаток и газ, содержащий в основном водород и оксид углерода (синтез – газ). Минеральная часть, состоящая главным образом из силикатов и металлов, плавится и разделяется на металл и

шлак. Оксид железа, содержащийся в шлаке, вступает в реакцию с коксовым остатком, восстанавливается до металла, образуя оксид углерода. Расплавленные негорючие включения непрерывно стекают в водяную ванну для образования гранул.

Восстановившийся металл непрерывно отделяется от шлака. Полученный расплав состоит в основном из железа, других металлов и кремния. Состав этой массы и количество электроэнергии, необходимое для её получения, зависят от количества и состава исходных материалов. Для нормального протекания процесса необходимо регулировать подачу отходов в печь. Шлаковый покров должен постоянно перемешиваться с поступающими холодными отходами, чего можно достичь, например перемешиванием расплава металла и шлака.

Горючие газы, образующиеся в результате реакции кислорода с углеродом, поднимаются вверх, проходя через опускающиеся твёрдые отходы. Выходящий газ, содержащий значительное количество водяных паров, некоторое количество «масляного тумана» и следы вредных примесей поступает в вихревой скруббер (центробежно - барботажный аппарат - ЦБА). Схема и принцип работы ЦБА подробно описаны в работе [52]. Полученный в результате газификации газ представляет собой чистое горючее топливо. Этот газ имеет большое преимущество перед природным, так как не содержит соединений серы и оксидов азота.

В период, когда металл полностью расплавлен, стены газификатора очень горячие, так как дуги удлиняются и сильно излучают теплоту на футеровку, которая нагревается до предельной для материала температуры, поэтому напряжение необходимо регулировать и снижать, либо непрерывно подавать отходы в камеру газификации.

Из изложенного следует, что необходимо иметь возможность регулировать в широких пределах мощность установки и её напряжение, а её электрооборудование должно выдерживать частые короткие замыкания и толчки нагрузки.

2.3 Энергетический расчёт зоны газификации

Расход электроэнергии на переработку техногенных отходов зависит не только от технологических факторов – элементного состава, умения персонала вести процесс, состояния футеровки, качества электродов, величины простоев и т. п., но и в не меньшей степени от того, насколько правильно выбран электрический режим печи [54]. Регулировать режим можно, например, изменяя длину дуги на графитированном электроде, а следовательно и общий ток цепи. Этот способ позволяет регулировать режим печи непрерывно и плавно, поднимая и опуская электрод с помощью системы автоматического управления, поддерживая на требуемом уровне ток и мощность печи.

Для удобства эксплуатации установки целесообразно выявить зависимость от тока её основных параметров; полезной к полной (активной) мощности, электрических потерь, электрического КПД и коэффициента мощности. Такого рода зависимости строят на основе электрической схемы замещения установки; они носят название электрических характеристик.

Электрическую схему замещения зоны газификации можно представить в виде однофазной цепочки последовательно включенных активных сопротивлений (рисунок 2.4). К активным сопротивлениям цепи относятся: сопротивление дуги плазматрона $R_{д1}$, сопротивление дуги на электроде $R_{д2}$ и сопротивление расплава ванны $R_{м}$. Из данного ряда сопротивлений $R_{д1}$ и $R_{д2}$ относятся к непостоянным сопротивлениям, так как во время эксплуатации значения их сопротивлений могут произвольно изменяться, а $R_{м}$ можно отнести к постоянному сопротивлению, если при этом поддерживать на заданном уровне состав и температуру шлака.

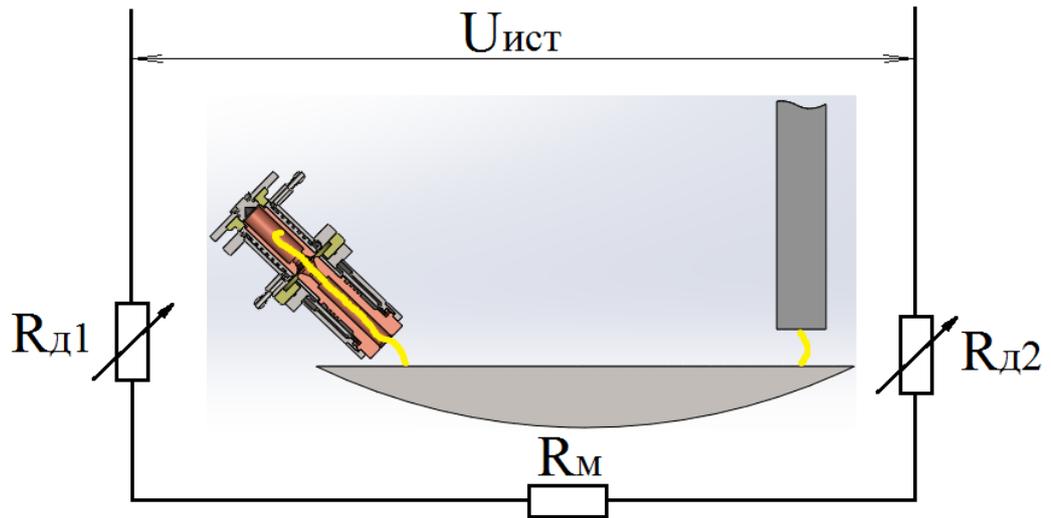


Рисунок 2.4 – Электрическая схема замещения

Допустим, что имеется некая высокотемпературная установка, предназначенная для переработки и уничтожения опасных отходов и в которой разработанный пароводяной плазмотрон, графитный электрод и ванна для жидкого шлака являются основными конструктивными элементами. В таком случае, настоятельно рекомендуется составить энергетический баланс, который будет давать ясную энергетическую картину всего процесса и позволит наметить меры по улучшению использования такой установки и её расходных показателей.

В этом случае, в приходную статью энергетического баланса будут входить следующие составляющие: 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. В расходную статью энергетического баланса будут входить: 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 итоге вид энергетического баланса примет вид:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 \pm \Delta, \quad (2.1)$$

где Δ - погрешность, обусловленная допущениями и расчётом.

Приведём демонстрационный расчёт уравнения энергетического баланса (2.1) для электротехнологической установки, геометрические параметры ванны с жидким шлаком которой представлены на рисунке 2.5.

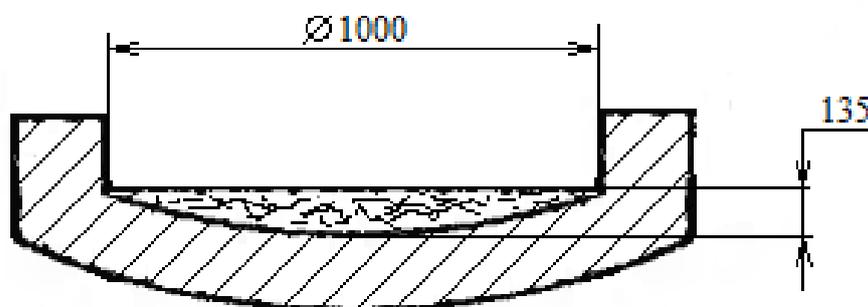


Рисунок 2.5 – Геометрия ванны под жидкий шлак

В качестве исходных данных примем следующие параметры:

1) масса углеродсодержащих отходов, подаваемая в камеру реактора = 100 кг, элементный состав в исходном состоянии, % масс: C=34,83; H=4,42; O=23,57; N=1,38; S=0,13; Cl=3,47; SiO₂=17,33; H₂O=14,87.

2) количество плазмообразующей среды, подаваемой в камеру газификации – водяного пара = 10 кг.

3) масса жидкого шлака \approx 160 кг, элементный состав в исходном состоянии, % масс: SiO₂=10,4; MnO=1; Fe=2; CaO=52,5; MgO=4,5; Al₂O₃=5.

Стоит отметить, что расчёт энергетического баланса приведён для первого цикла работы установки (первой загрузки отходов в газификатор). Такой режим работы является наиболее энергоёмким, так как минеральную часть всей массы приходится нагревать от 20 до 1600°C. Если установку эксплуатировать непрерывно, то при последующих циклах загрузки отходов в неё, вид уравнения энергетического баланса будет отличаться от (2.1), так как шлак нагревать уже не придётся. Из сказанного следует, что при разработке составляющих узлов установки, за основу расчёта следует брать именно этот режим.

Сначала, необходимо рассчитать количество тепла, необходимого для нагревания всей органической и минеральной частей массы, одновременно

загруженной в газификатор до заданной температуры. Вычислим количество тепла, необходимого для нагревания 100 кг медицинских отходов. Общая формула для определения энергии:

$$Q_{ob} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (2.2)$$

т.е. общее количество тепла (энергии) определяется суммой отдельных количеств тепла, необходимых для нагрева отдельных компонентов материала

$$Q_i = m_i C_{pi} \Delta T, \quad (2.3)$$

где m_i – масса i -й компоненты вещества, C_{pi} – удельная (средняя на интервале температур) теплоемкость при постоянном давлении. Из справочника [55] находим значения C_p на интервале температур 20°C – 1200°C для: C – 14,23 Дж/моль · град; H_2 – 28,85 Дж/моль · град; O_2 – 31,69 Дж/моль · град; N_2 – 30,38 Дж/моль · град; S – 28 Дж/моль · град; H_2O – 36,77 Дж/моль · град; SiO_2 – 60,18 Дж/моль · град.

Определяем количество тепла, необходимое для нагрева 100 кг медицинских отходов:

$$H_2 - 4420 \text{ г} = 2210 \cdot 28,85 \cdot 1180 / 3600 = 20,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.4)$$

$$N_2 - 1380 \text{ г} = 49,3 \cdot 30,38 \cdot 1180 / 3600 = 0,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.5)$$

$$C - 34830 \text{ г} = 2902,5 \cdot 14,23 \cdot 1180 / 3600 = 13,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.6)$$

$$O_2 - 23570 \text{ г} = 736,6 \cdot 31,69 \cdot 1180 / 3600 = 7,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.7)$$

$$H_2O - 14870 \text{ г} = 826,1 \cdot 36,77 \cdot 1180 / 3600 = 9,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.8)$$

$$SiO_2 - 17330 \text{ г} = 288,9 \cdot 60,18 \cdot 1180 / 3600 = 5,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad (2.9)$$

$$Q_{oth} = 20,9 + 0,5 + 13,5 + 7,7 + 9,9 + 5,7 = 58,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2.10)$$

Взяв удельные энергозатраты на получение пара из рисунка 1.2, определим количество тепла, необходимое для нагрева 10 кг воды:

$$Q_B = q \cdot m = 3,5 \cdot 10^4 \text{ кДж} = 9,7 \text{ кВт}. \quad (2.11)$$

где q – удельные энергозатраты на получение сухого пара, кДж/г; m – масса плазмообразующей среды – воды.

Далее определим количество тепла, необходимое для нагрева 160 кг шлака. Сведения о теплофизических свойствах, в том числе о теплоемкости, рафинировочных шлаков в зависимости от их состава в литературе практически отсутствуют [56-58]. Так, в работе [58] приведены результаты исследований теплофизических реальных шлаков в интервале их основности от 0,5 до 1,4, которые показывают, что при увеличении основности уменьшаются температуропроводность, теплоёмкость и теплопроводность шлаков (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Теплоёмкость шлака

CaO/SiO ₂	Температуропроводность, α , м ² /с·10 ⁻⁶		Изобарная удельная теплоёмкость, Ср, Дж/кг·К		Теплопроводность, λ , Вт/м·К	
	1000°С	1200°С	1000°С	1200°С	1000°С	1200°С
0,55	1,22	1,19	1215	1440	3,4	3,9
0,8	1,05	0,99	1050	1270	2,6	3,0
1,37	0,88	0,85	1120	1320	2,3	2,6

Для определения необходимого тепла для нагрева 160 кг шлака воспользуемся усреднёнными данными из таблицы 2.1 и формулой (2.3):

$$Q_{shl} = 160 \cdot 1,1 \cdot 1580 / 3600 = 77,2 \text{ кВт} \quad (2.12)$$

После того, как мы определили тепло, которое необходимо затратить на нагрев отходов, воды и шлака до заданной температуры, определим составляющее Q_4 , которое входит в уравнение энергетического баланса:

$$Q_4 = Q_{oth} + Q_B + Q_{shl} = 58,2 + 9,7 + 77,2 = 145,1 \text{ кВт} \quad (2.13)$$

Для определения Q_3 и Q_5 воспользуемся данными, полученными в главе III настоящей работы (рисунок 3.3). По кривой «водяной пар (14,87%)» на данном рисунке определяем, что при совместной подачей отходов и водяного пара массой

в 10 кг в результате протекания основных экзо- и эндотермических реакций (3.8) – (3.11) в газификаторе будет выделяться ≈ 4 кВт, то есть:

$$Q_3 - Q_5 = 4 \text{ кВт.} \quad (2.14)$$

Для численного моделирования электромагнитных процессов в расплаве металла сейчас широко используются специализированные пакеты программ и пакеты мультифизик [59-65]. Определение выделяемого тепла в ванне с жидким шлаком осуществлялся численным методом в ПК ANSYS. Большие трудности в использовании пакетов прикладных программ возникают с выбором метода решения, настроек, наложении граничных и начальных условий, а также при выборе расчётной области и размерности модели.

Семейство зависимостей электропроводности шлаков от их основности и температуры представлены на рисунке 2.6 [58]. Исходя из этих данных, удельное сопротивление для выбранного нами шлака при температуре $1600^\circ\text{C} \approx 0,018$ Ом·м.

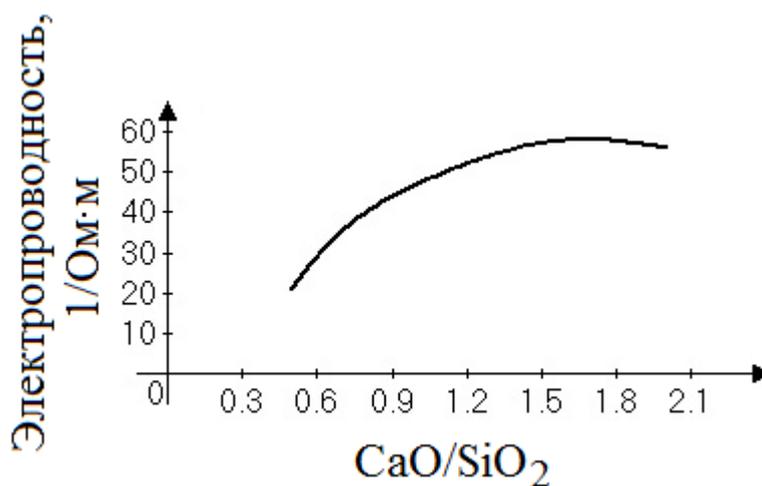


Рисунок 2.6 – Зависимость электропроводности шлаков от основности

Для построения физической модели были сделаны следующие допущения:

- 1) среда считается немагнитной ($\mu = 1$);

2) среда является хорошим проводником и её диэлектрической проницаемостью можно пренебречь ($\epsilon = 1$);

3) физические характеристики среды предполагаются однородными и изотропными;

4) химические реакции не учитываются;

5) протекающие процессы описываются в стационарной постановке.

Задача решалась при следующих граничных условиях:

1) На краях поверхности моделируемого объёма расплава условно были выбраны опорные пятна дуг, через которые протекает постоянный ток в диапазоне от 100 до 300 А (на рисунке 2.7 протекание тока обозначено стрелками).

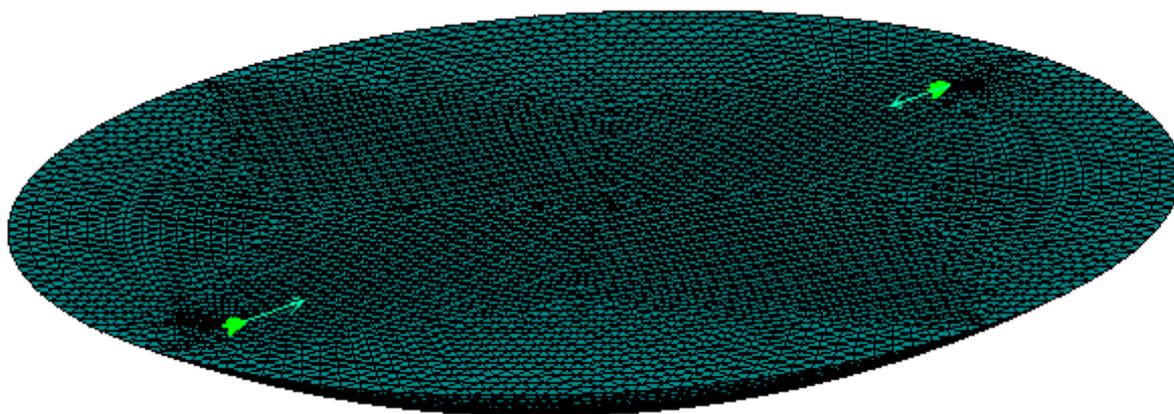


Рисунок 2.7 – Граничное условие протекающего тока

2) Тот факт, что магнитный поток принимается не выходящим за области модели, подразумевает, что поток будет параллелен внешним границам модели. Это допущение возможно, если размеры моделируемого воздушного пространства, окружающего магнитную систему, достаточны для решения поставленной задачи. Это допущение моделируется “потокотпараллельным” граничным условием (рисунок 2.8).

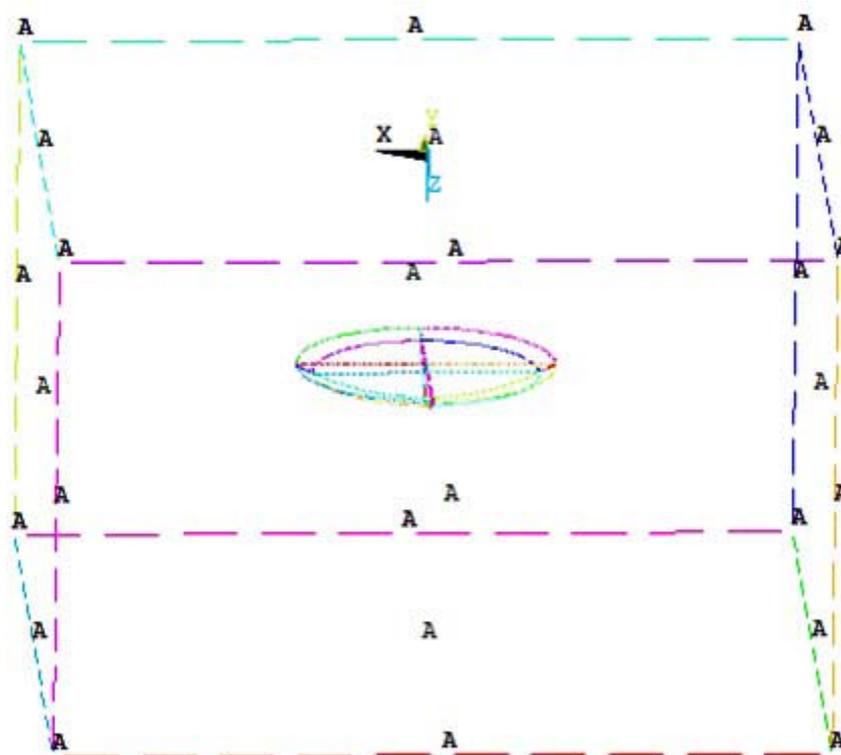


Рисунок 2.8 – Граничное условие потокопараллельности

В результате численного моделирования была получена зависимость выделяемого тепла в жидком шлаке (при удельном электрическом сопротивлении шлака $0,018 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) от величины протекающего тока (рисунок 2.9).

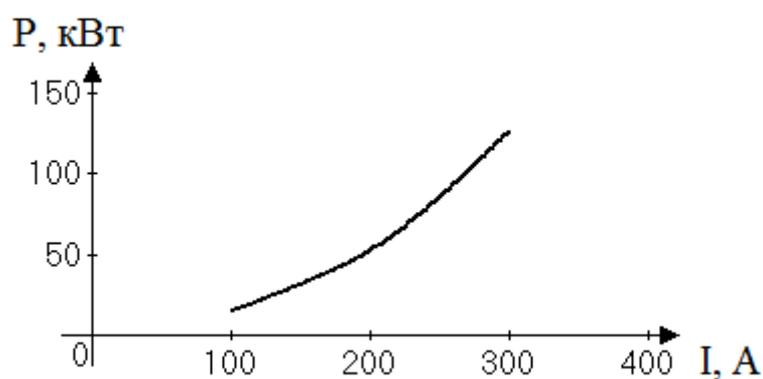


Рисунок 2.9 – Тепло выделяемое в шлаке в зависимости от протекающего тока

На рисунке 2.10 приведена зависимость выделяемого тепла в расплаве от его удельного электрического сопротивления и величины протекающего по нему

тока. Из графиков видно, что если обеспечить регулирование удельного электрического сопротивления расплава в рабочем режиме в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-4}$ Ом·м, то выделяемое тепло в расплаве ванны будет составлять 10 – 100 кВт соответственно.

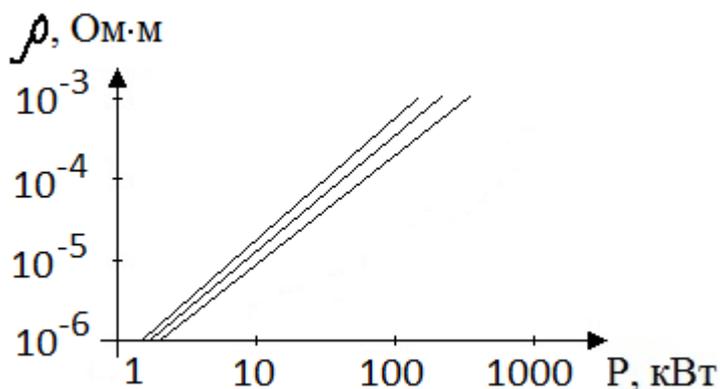


Рисунок 2.10 – Зависимость выделяемого тепла в расплаве от его удельного электрического сопротивления

Для определения тепла, выделяемого в дуговом разряде между расплавом и графитным электродом, необходимо экспериментальным путём получить семейство ВАХ этого дугового разряда. Не располагая такими данными, условно примем мощность, выделяемую в этой дуге равной половине мощности, выделяемой в дуге плазмотрона. Такое предположение сделано на основе очевидной неравнозначности этих дуг, так как, во-первых, дуга на графитном электроде горит частично в пароводяной среде, а частично в синтез-газе и во-вторых, длина её меньше, чем длина дуги плазмотрона, что приводит к меньшему выделению мощности по сравнению с дугой плазмотрона. При токе 200 А, в дуге плазмотрона будет выделяться 70 кВт (рисунок 4.15 кривая 1 - $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с), следовательно в дуге на графитном электроде – 35 кВт и в ванне с жидким шлаком – 55,5 кВт (рисунок 2.9), то есть:

$$Q_1 = 70 + 35 + 55,5 = 160,5 \text{ кВт.} \quad (2.17)$$

Тепло Q_2 представляет собой теплосодержание продуктов, загружаемых в установки в течение плавки. Значение этого тепла в данном случае мало и может

не учитываться, так как отходы предварительно не подвергались нагреву. В других случаях Q_2 может составлять основную часть приходной статьи баланса.

Из практики известно, что реактор газификатора в большинстве случаев имеет КПД 90%, следовательно:

$$Q_6 = (Q_1 + Q_3 - Q_5) \cdot 0,1 = (160,5 + 4) \cdot 0,1 = 16,5 \text{ кВт.} \quad (2.18)$$

В итоге уравнение энергетического баланса примет вид:

$$160,5 + 0 + 45,8 = 145,1 + 41,8 + 16,5 \quad (2.19)$$

$$206,3 \approx 203,4$$

Погрешность расчёта энергии $\Delta \approx 2\%$.

2.4 Заключение по главе

Описанная плазменно-дуговая технология переработки опасных отходов имеет ряд преимуществ по сравнению с распространёнными способами обезвреживания, например, как установки огневого обезвреживания слоевого типа: цикл процесса замкнут; процесс является безотходным; полностью разрушаются все органические соединения, уничтожается болезнетворная микрофлора; синтез-газ, полученный в результате газификации, содержит меньше вредных примесей, чем газы мусоросжигательных установок. Возрастает ресурс работы плазмотрона: во-первых, за счёт дополнительно выделяемого тепла в расплаве шлака, за счёт чего нагрузку на плазмотрон можно уменьшить, а во-вторых, когда плазмотрон эксплуатируется в плавильном режиме, то вспомогательный электрод-катод перестаёт испытывать тепловую нагрузку от опорного пятна дуги, что многократно увеличивает ресурс работы плазмотрона в целом.

Плавленый шлак из рабочей камеры будет представлять собой инертный строительный материал высокого качества, недостижимого при низко- и среднетемпературном сжигании техногенных отходов. Такой шлак можно использовать, прежде всего, для ремонта и строительства дорог и тротуаров.

ГЛАВА III. Плазменная газификация углеродсодержащих техногенных отходов

К углеродсодержащим техногенным отходам относятся: муниципальные (твёрдые бытовые отходы – ТБО), сельскохозяйственные (рисовая лузга и т.д.), биологические (медицинские, биологические иловые отложения – БИО) и т.д. [74]. Несмотря на различную природу этих отходов, все они состоят из одинаковых химических элементов: углерода, водорода, кислорода, азота, хлора, серы, золы (комплекс неорганических элементов и соединений), воды (влаги), могут содержать опасные для окружающей среды элементы и соединения (болезнетворные микроорганизмы, тяжёлые металлы и т.д.).

Общепринятым способом подачи тепла в зону газификации углерода является экзотермическая реакция горения углерода в кислороде воздуха или в чистом кислороде. Газификаторы на кислородном дутье позволяют получать более калорийный, чем на воздушном дутье, газ, в котором отсутствуют окислы азота. Но энергозатраты на получение чистого кислорода сравнимы с энергозатратами на газификацию отходов, поэтому в качестве окислителя в большинстве случаев используется воздух или водяной пар.

Решение проблемы газификации углеродсодержащих отходов связано с комплексом экологических и энергетических задач: необходимо с одной стороны, разложить токсичные органические соединения на простые и безопасные, с другой стороны, содержащуюся в отходах потенциальную энергию горения (калорийность) использовать в энергетических или химических установках.

Плазменная газификация позволяет вводить тепло в зону газификации с использованием в качестве плазмообразующих газов воздух, кислород, водород, пары воды, синтез-газ, любой инертный газ. Для каждого рода газа требуется отдельное техническое решение конструкции плазменного устройства (плазмотрона).

Если основная цель газификации заключается в получении синтез-газа, пригодного для конверсии углеводородов (например, получение метанола), то использование воздуха, азота и других инертных газов в качестве

плазмообразующих технологически целесообразно. Для получения синтез-газа, пригодного для энергетических установок (сжигание в двигателях внутреннего сгорания, энергетических котлах ТЭС и т.д.), возможно использование в качестве плазмообразующего газа относительно небольшого количества воздуха и азота. Если основная цель газификации – уничтожение токсичных отходов, то в качестве плазмообразующего газа выбирается газ, исключающий возможность образования новых опасных соединений, например, водяной пар.

Энергетическая сущность газификации состоит в том, что исходную калорийность отходов накапливают в окиси углерода и водороде, т.е. твёрдое топливо переводится в газообразное со значительным сохранением теплотворной способности.

Экологическая сущность газификации заключается в том, что сложные органические соединения, опасные для окружающей среды, переводятся в простые и безопасные, уничтожаются целые биологические комплексы болезнетворных микроорганизмов. В восстановительной атмосфере водорода и окиси углерода не образуются диоксины и окислы азоты.

Благодаря относительно малому объёму синтез-газа по сравнению с объёмом продуктов полного сгорания отходов появляется возможность уменьшить габариты (и стоимость) очистных устройств в несколько раз.

В настоящей главе поставлена задача: теоретически исследовать и обосновать энергетическую и экологическую целесообразность пароводяной плазменной газификации.

3.1 Расчётно-теоретические методы исследования плазменно-энергетических процессов

Наиболее полные сведения, необходимые для создания технологий термохимических процессов превращений отходов (термоподготовка, газификация и комплексная переработка), наряду с экспериментом могут быть получены с помощью расчётно-теоретических методов, определяющих оптимальные параметры процессов и конструктивные параметры устройств для

их осуществления. В данном случае расчётно-теоретические методы исследований можно разделить на три основные группы: термодинамический анализ, теплофизические расчёты тепломассопереноса и кинетические расчёты химических реакций [66].

Термодинамические расчёты дают параметры рабочего тела (выход целевых продуктов, диапазон температур, удельные энергозатраты, содержание побочных продуктов и др.) в предельном состоянии, которое может быть и не реализовано, так как во многих ситуациях показатели реальных процессов термохимических превращений топлив отклоняются от термохимически – равновесных значений и в определённой мере корректируются кинетическими расчётами с учётом теплообмена и массопереноса в рассматриваемых системах.

Как правило [67-69], разработку технологических процессов, особенно новых, начинают с их термодинамического анализа, чтобы исключить принципиально неверные технические решения и найти области предельных значений параметров, к достижению которых можно стремиться, обеспечив максимально достижимую в конкретных условиях интенсивность тепло-массообмена и кинетики процессов.

Термодинамический анализ проводят путём применения основных законов термодинамики в различных сочетаниях. Наиболее распространённым приёмом расчёта равновесного состава продуктов термохимических превращений топлив [70-72] является использование уравнений химических реакций рассматриваемых процессов, нахождение для них изобарно-изотермического потенциала Гиббса

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T \cdot \Delta S_T^0 \quad (3.1)$$

и вычисление на этой основе константы равновесия реакции:

$$\ln K = \frac{-\Delta G}{RT} \quad (3.2)$$

Изобарно-изотермический термодинамический процесс протекает при постоянном объёме и давлении системы $p=const$, $V=const$.

Для нахождения зависимости концентраций от температуры K_p из уравнения изотермы химической реакции (3.2) приравнивают константе равновесия, выражаемой через равновесные концентрации компонентов (C_i) из закона действующих масс:

$$K_p = \prod_i (C_i^{n_i}), \quad (3.3)$$

где n_i – стехиометрические коэффициенты в уравнениях химических реакций; C_i – концентрация i -го компонента.

Таким образом, для вычисления равновесных концентраций компонентов термодинамической системы необходимо записать набор независимых химических реакций, определяющих путь системы к равновесию, а затем рассчитать для них константы равновесия по уравнениям (3.2) и (3.3). Учитывая сложный состав термодинамических систем (топливо + окислитель), включающих до 25 элементов, указанный набор может состоять из десятков реакций, а число компонентов в состоянии равновесия может достигать несколько сотен [69,70].

В этой связи весьма привлекателен универсальный метод расчёта многокомпонентных гетерогенных систем, разработанный Г.В. Синяревым и Б.Г. Трусовым (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [67-69] и базирующийся на принципе максимума энтропии для изолированных термодинамических систем, находящихся в состоянии равновесия, характеризующегося максимумом энтропии относительно термодинамических степеней свободы. К последним относятся концентрации компонентов системы и какая-либо пара задаваемых переменных (температура и давление, удельный объём и энтальпия и т.д.). Установление равновесия достигается за счёт внутренних фазовых и химических превращений в изолированной системе, параметры равновесия которой могут быть определены путём решения задачи о нахождении максимума энтропии системы с учётом ограничений, накладываемых условиями постоянства массы химических элементов, электронейтральности системы в целом, связи между внутренней энергией, удельным объёмом, давлением и температурой системы.

Рассмотрение уравнений химических реакций и вычислений констант равновесия по уравнениям (3.2), (3.3) делаются излишними. Поэтому для расчёта равновесных концентраций и других параметров системы оказалось достаточным привлечь лишь две термодинамические функции индивидуальных веществ: энтропию (S_i) и полную энтальпию

$$I_i(T) = \Delta H_i^0(298) + \int_{298}^T C_{P_i} dT, \quad (3.4)$$

встречающиеся во всех расчётных выражениях в виде универсальной комбинации

$$G_T^0 = \Phi_{\Pi}^* = S_i^0 - \frac{I_i}{T}. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) представляет собой полный приведённый изобарно-изотермический потенциал Гиббса [69]. Использование принципа максимума энтропии, для определения которой авторы работы [67] применяют теорему Нернста (III закон термодинамики) в совокупности с законами сохранения массы и энергии в изолированной системе, позволяет (при задании любой пары термодинамических функций из набора P, T, I, S, V, U и исходного элементного состава рабочего тела) определить равновесный состав компонентов термодинамической системы в газовой и конденсированной фазах. Это весьма важно при рассмотрении термохимических превращений органической и минеральной частей топлив, так как последняя, как правило, остаётся в твёрдом остатке.

Кроме упрощения расчётной системы уравнений равновесных состояний, сокращения необходимой для расчёта информации, касающейся термодинамических свойств компонентов, авторы работ [68,69] создали универсальный расчётный алгоритм, основанный на рассмотрении термодинамической системы как совокупности простых индивидуальных веществ. Указанные обстоятельства позволяют распространять этот метод, помимо металлургии [68], на различные области науки и техники, в том числе и

на область топливоиспользования, резко сократить объём вычислений и автоматизировать процесс их осуществления на ЭВМ.

Разумеется, методы расчёта равновесий на основе максимума энтропии [67-69] и методы, базирующиеся на законе действующих масс [70-72], математически связаны между собой, и при определённых условиях можно перейти от уравнений, связывающих энтропию с концентрациями компонентов, к уравнениям констант химического равновесия [67].

Указанные преимущества позволили авторам работ [67-69] создать алгоритмы и универсальную программу – АСТРА-4, опубликованную в монографиях [67,73]. В настоящее время эта программа широко используется в России, Казахстане, Украине, Киргизии и в других странах СНГ [73-78].

Подавляющее число работ, посвящённых термодинамическим расчётам процессов пиролиза, газификации, термообработке углей, в том числе и плазменной, выполнены методами, основанными на законе действующих масс и определении констант химического равновесия [70-72,74,75,79,80]. Однако в последнее время появляется всё больше исследований термохимических превращений топлив [77,78,81-83], выполняемых с помощью программы АСТРА-4, что существенно сокращает объём вычислений и упрощает подготовку исходных данных к расчёту, поскольку при программе создан обширный банк термодинамических свойств индивидуальных веществ, включающий около 3500 веществ [73].

3.2 Термодинамический анализ газификации на примере медико-биологических отходов с помощью ПК АСТРА-4

Для пароплазменной газификации 1 кг медицинских отходов (шприцы, перчатки, перевязочные материалы, органические остатки и прочее, состоящие примерно из 60% целлюлозы, 30% пластмасс, 10% жидкости) требуется около 1 кВт·ч электроэнергии с получением в конечном итоге синтез-газа в количестве 1,1-1,4 м³. Для обеспечения производительности установки 200 т/год

(потребность средней клиники или передвижной установки) требуется мощность пароводяного плазмотрона около 40 кВт, расход воды (на пар) – 30 кг/ч [35].

Вредность медицинских отходов – свойство известное и понимаемое; некоторые из компонент считаются до того вредными, что их нельзя смешивать с ТБО.

Среди всего больничного мусора к специфическим медицинским отходам относятся, как минимум, следующие: перевязочные материалы (бинты, вата, салфетки); операционные отходы (иссечённые органы, кожные лоскуты, эмбрионы, ампутированные конечности); металл (сломанные медицинские инструменты, проволочные шины, иглы для шприцев, другие металлические предметы); стекло (ампулы, банки, флаконы и др.); резина, кожа, пластики (операционные перчатки, трубки, грелки, рентгеновская плёнка и т.д.); гипсовые повязки. По отечественным данным, специфические отходы составляют около 22% по массе от всего больничного мусора, а их накопление от 0,5 до 0,64 кг на койку в сутки [53].

Медицинские отходы хранятся и поставляются в одноразовых пакетах, используемых специально для сбора отходов. Пакеты обеспечивают герметизацию и возможность безопасного сбора в них до 15 кг. Пакеты оснащаются специальными стяжками, которые позволяют быстро и эффективно герметизировать пакеты после их заполнения. Пакеты имеют разные цвета в соответствии с тем классом отходов, для которых предназначены. Пакеты для сбора отходов класса А должны иметь белую окраску, класса Б - желтую, класса В - красную, класса Г - черную. При соблюдении всех правил герметизации использование пакетов снижает до 0% риск распространения инфекции за пределы лечебно-профилактического учреждения (ЛПУ).

Один из основных показателей теплотехнических характеристик всех отходов, в том числе и медицинских это влажность. Значения влажности отходов ЛПУ колеблются от 20 до 70%. Максимальные значения достигаются в осенне-весенний период, однако изменение погоды не являются определяющими. В значительной степени влажность зависит от наличия инфицированного

материала, прошедшего дезинфекцию (массовая доля которого может составлять до 65 – 70%, а влажность до 85%) и доли пищевых отходов.

Зольность отходов ЛПУ колеблется в пределах 10 – 20%; горючая масса от 20 до 75%. Элементный состав при известном морфологическом составе определяется по стандартным методикам. В связи со значительным колебанием морфологического состава, элементный состав определяется для каждого случая конкретно.

Для демонстрационного термодинамического исследования были выбраны медицинские отходы следующего состава, % масс: C=20,9; H=2,65; O=14,14; N=0,83; S=0,08; Cl=2,08; SiO₂=10,4; H₂O=48,92.

Органическая масса указанного состава составляет около 90%, а минеральная – около 10%. Для выбора рациональной схемы газификации данного вида отходов был проведён термодинамический анализ процессов его воздушной и паровой газификации.

Расчёты процессов газификации данных медицинских отходов выполнены при температуре 1200°С при атмосферном давлении 0,1 МПа. Предполагалось, что температурный уровень процесса поддерживается за счёт подвода энергии от внешнего источника тепла – разработанного плазмотрона.

При расчёте воздушной газификации медицинских отходов исходная термодинамическая система состояла из 100 кг медицинских отходов различной влажности для двух случаев (14,87 и 48,92%) совместно с плазмообразующим газом - воздухом (масса воздуха изменялась от 0 до 50 кг). Согласно справочникам воздух содержит примерно 79% объёмных азота и 21% объёмных кислорода, при этом плотность воздуха при нормальных условиях составляет 28,96 кг/кмоль. Следовательно, 1 кг воздуха в пересчёте на мольный состав равен 0,035 кмоль.

Учитывая соотношение 79% азота и 21% кислорода получаем на 1 кг воздуха: азот – 0,028 кмоль = 0,79 кг; кислород – 0,007 кмоль = 0,21 кг.

Аналогично воздушной газификации при расчёте паровой газификации было взято: 100 кг отходов различной влажности для двух случаев (14,87 и

48,92%) совместно с плазмообразующим газом – водяным паром (масса изменялась от 0 до 50 кг).

В результате термодинамического анализа были получены: равновесный состав продукта; энергия, получаемая в реакторе в результате протекания основных эндо- и экзотермических реакций и калорийность получаемого синтез-газа для всех вариантов.

При паровой газификации отходов с влажностью 14,87% и с использованием плазмообразующей среды до 10 кг (рисунок 3.1а) газовая фаза в основном состоит из синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$). При дальнейшем увеличении плазмообразующей среды в газовую фазу включаются окислители (H_2O и CO_2). Если влажность отходов начать увеличивать (за счёт исходной составляющей либо за счёт дополнительной подачи плазмообразующей среды), то концентрация окислителей может превысить концентрацию синтез-газа, при этом концентрация синтез-газа начинает уменьшаться, а концентрация окислителей возрастать (рисунок 3.1б).

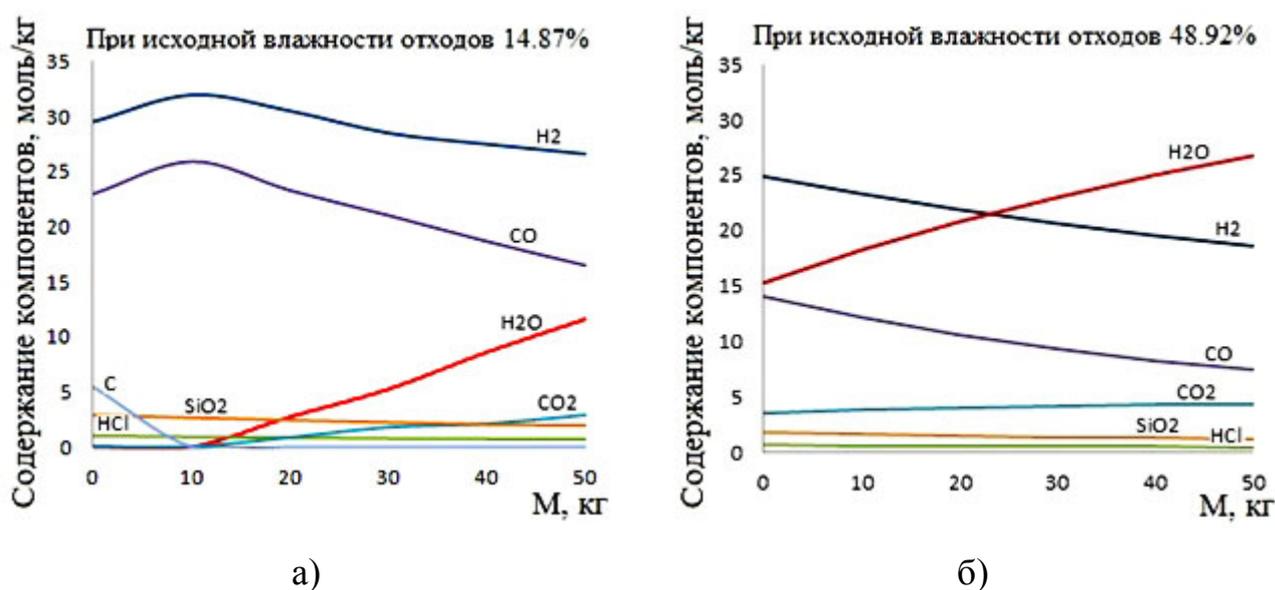


Рисунок 3.1 – Зависимость равновесного состава продукта от количества плазмообразующей среды – водяного пара

Были проведены расчёты воздушной газификации той же массы отходов. Аналогично паровой газификации с использованием плазмообразующей среды до

≈ 15 кг газовая фаза состоит в основном из синтез-газа (рисунок 3.2а). При дальнейшем увеличении плазмообразующей среды в газовую фазу начинают включаться окислители и молекулярный азот N₂ (рисунок 3.2), который при взаимодействии с кислородом на выходе из реактора способен образовывать вредные соединения NO_x. Как и в случае с пароплазменной газификацией видно, что концентрация синтез-газа при увеличении плазмообразующей среды снижается, а окислители и молекулярный азот увеличиваются.

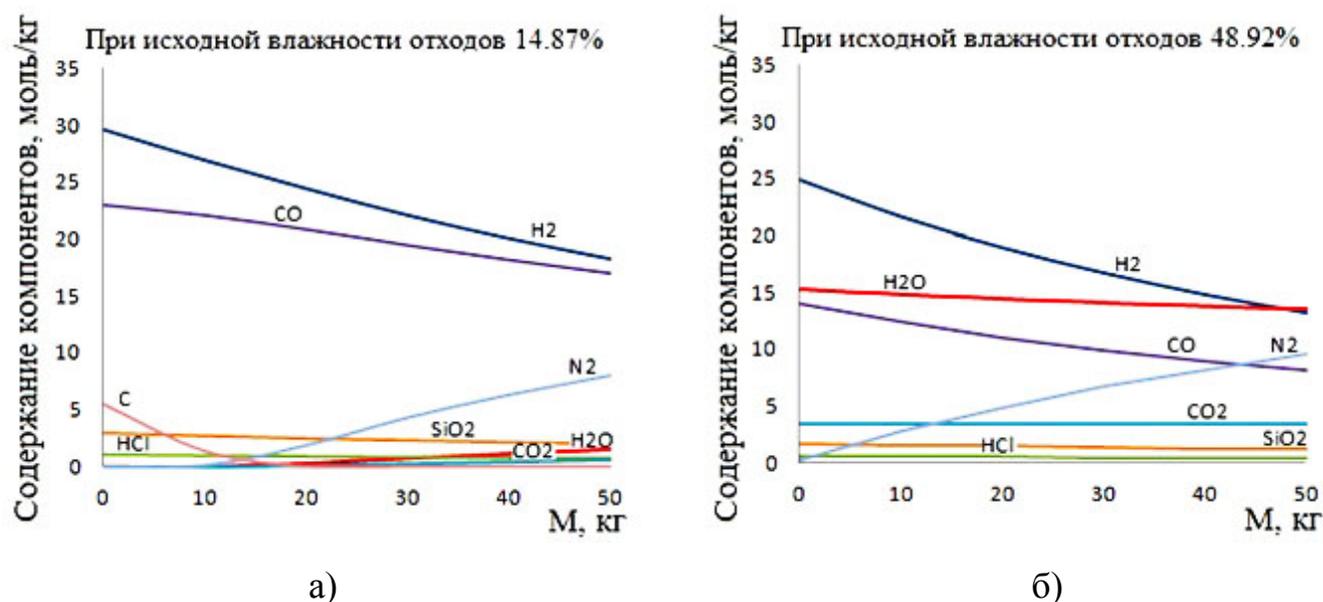


Рисунок 3.2 – Зависимость равновесного состава продукта от количества плазмообразующей среды – воздуха

По данным работы [107] основными уравнениями химических реакций при газификации углеродсодержащих отходов являются:



$$K = \frac{[CO] + [H_2O]}{[CO_2] + [H_2]} = 2,5. \quad (3.9)$$

Согласно этим уравнениям (3.8) – (3.11) были проведены расчёты и на рисунке 3.3 представлены зависимости выделяемого тепла в реакторе в результате

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 реакторе выделяется больше, чем при использовании водяного пара. Это означает, что при работе плазмотрона на водяном паре придётся в дуговой разряд вкладывать большую мощность, чем при воздушной газификации.

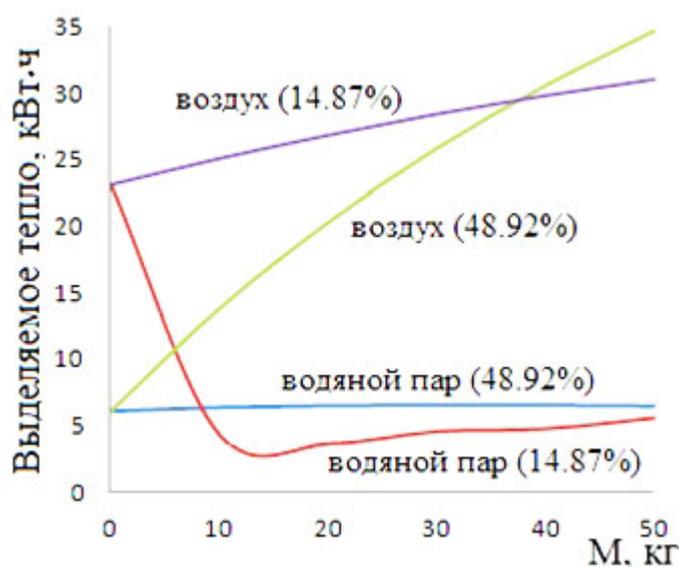


Рисунок 3.3 – Зависимость выделяемого тепла в реакторе от количества плазмообразующей среды

Однако, плазменно-паровая газификация позволяет перевести органическую массу отходов в высококалорийный синтез-газ (свободный от оксида азота) (рисунок 3.4). Калорийность синтез-газа будет увеличиваться до тех пор, пока будет оставаться непроивзаимодействовавшим углерод, чего не наблюдается при воздушной газификации, поэтому если цель газификации заключается в получении высококалорийного синтез-газа, то необходимо заранее знать количество углерода в отходах и применять водяной пар в качестве плазмообразующей среды в соответствующем количестве.

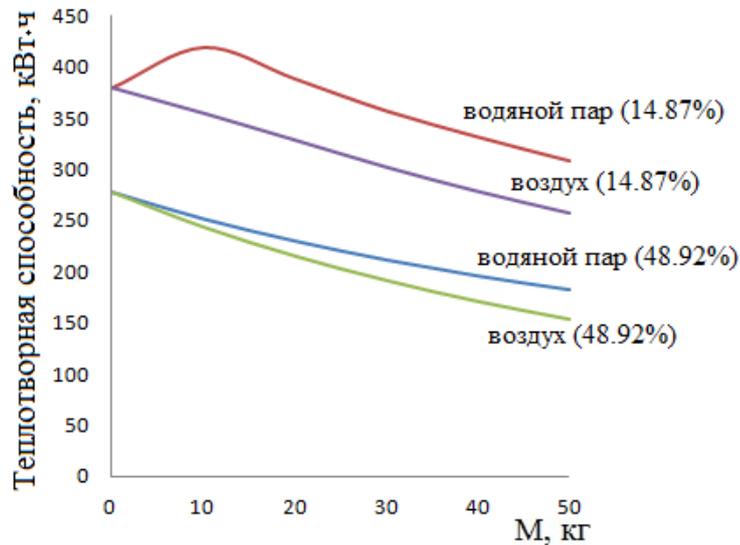


Рисунок 3.4 – Зависимость калорийности синтез-газа от количества плазмообразующей среды

Тепловой баланс рабочего пространства газификатора представляет уравнение, связывающее приход и расход тепла [84]. При составлении теплового баланса заданными считают вид топлива (элементный состав), производительность и среднемассовую температуру в реакторе.

При плазменной газификации в реакторе газификатора проходят экзотермические и эндотермические реакции, энергия плазмы потребляется от внешнего источника (электрическая энергия), поэтому к приходной статье теплового баланса относятся: Q_{PI} – тепло, поступающее от плазмотрона; Q_{EKZ} – тепло, поступающее от экзотермических реакций; Q_T – тепло, поступающее с предварительно нагретыми отходами либо паром. К расходной статье теплового баланса относятся: Q_M – тепло, затраченное на нагрев отходов до температуры реакционной зоны, Q_{END} – тепло эндотермических реакций, Q_{pot} – тепло, уносимое из реактора через футеровку, охлаждаемые элементы печи, излучением через смотровые окна и т.д. Тогда уравнение теплового баланса будет:

$$Q_T + Q_{PI} + Q_{EKZ} = Q_M + Q_{END} + Q_{pot} \quad (3.10)$$

где $Q_T = \sum_{i=1}^n Q_{Ti}$ – тепло, предварительно нагретых отходов либо пара; $Q_{Pl} = P \cdot t$

– тепло, поступающее от плазмотронов; $Q_{EKZ} = \sum_{i=1}^n Q_{EKZi}$ – тепло,

экзотермических реакций; $Q_M = \sum_{i=1}^n Q_{Mi}$ – тепло, затраченное на нагревание

отходов до температуры реактора; $Q_{END} = \sum_{i=1}^n Q_{ENDi}$ – тепло, поглощённое

эндотермическими реакциями; Q_{pot} – сумма всех тепловых потерь в газификаторе; Q_{Ti} – тепло i -й компоненты отходов, P – мощность плазмотрона, t – время; Q_{EKZi} – тепло, i -й экзотермической реакции.

Зная исходный состав и теплофизические свойства компонентов отходов (справочные данные [55]) можно рассчитать количество тепла Q_{Mi} для нагрева каждой компоненты отходов, а затем суммировать тепло и получить Q_M .

3.3 Заключение по главе

Если основная цель газификации – уничтожение токсичных отходов, то в качестве плазмообразующего газа выбирается водяной пар, в результате чего исключается возможность образования новых опасных соединений. При этом ПК АСТРА-4 позволяет провести численное исследование газификации любых отходов с целью определения требуемых энергетических параметров для создания внешнего теплового источника – плазмотрона.

Полученный синтез-газ является высококачественным энергетическим газом, кроме того, его можно использовать для синтеза синтетического жидкого топлива, метанола. Полученный синтез-газ – это также высокопотенциальный газ-восстановитель, который может быть использован вместо металлургического кокса для прямого восстановления железа.

ГЛАВА IV. Пароводяной плазмотрон и его характеристики

Глава посвящена описанию экспериментальной установки – разработанному пароводяному плазмотрону и сопутствующим ему технологическим узлам – парогенератору и нагревателю воздуха. Дано подробное описание подсистем (электрической, газовой и охлаждающей), из которых состоит экспериментальная установка и которые обеспечивают функционирование плазмотрона. Представлены полученные экспериментальным путём энергетические, электрические и ресурсные характеристики данного устройства. Приведены результаты численного расчёта в ПК ANSYS составного электрода, на основании чего обоснован выбор наиболее оптимального из них. В заключение раздела приведён ряд рекомендаций, выявленных в результате проделанной работы, соблюдая которые можно достичь продолжительного ресурса работы плазмотрона.

4.1 Пароводяной плазмотрон как электротехнологическая система

Разработанная трёхмерная модель в разрезе электродугового плазмотрона с пароводяной стабилизацией дуги представлена на рисунке 4.1 [85-91].

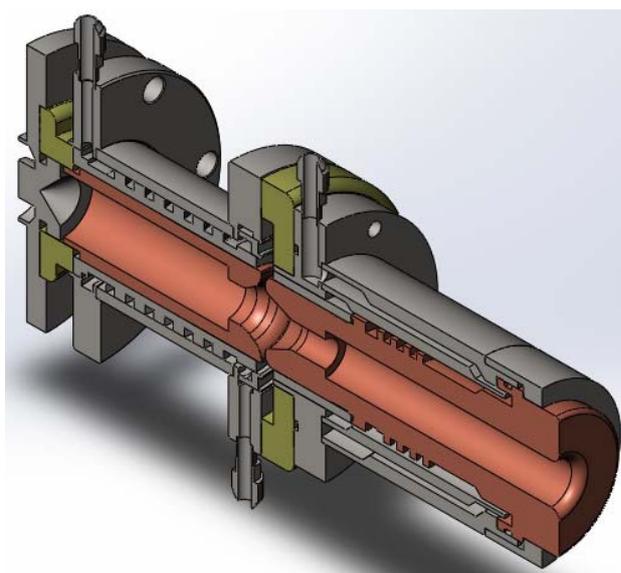


Рисунок 4.1 – Трёхмерная модель разработанного пароводяного плазмотрона

Конструктивная схема однокамерного плазмотрона плавильного с внутренним стаканообразным электродом – анодом ранее была исследована и испытана при работе на плазмообразующем газе – гелии [92]. Схема плазмотрона для работы на гелии приведена на рисунке 4.2. Плазмообразующая среда – гелий используется при дуговой сварке разнородных металлов и плазменно-дуговой плавке титана и алюминия. Длительная работа плазмотрона достигается за счёт быстрого перемещения анодного пятна по внутренней поверхности медного цилиндрического электрода как в окружном направлении, так и в осевом, создавая обширную зону A эрозии электрода. Осевое перемещение происходит естественным образом за счёт движения радиального участка дуги вместе с потоком газа вглубь электрода. Затем происходит пробой дуга – стенка (показано стрелкой) и снова анодное пятно по спирали движется вглубь электрода. Чем больше расход газа, тем больше длина A зоны выработки электрода и тем больше ресурс плазмотрона. Как показала эксплуатация промышленного плазмотрона, при токе 3000 А ресурс анода составляет 300 часов и более.

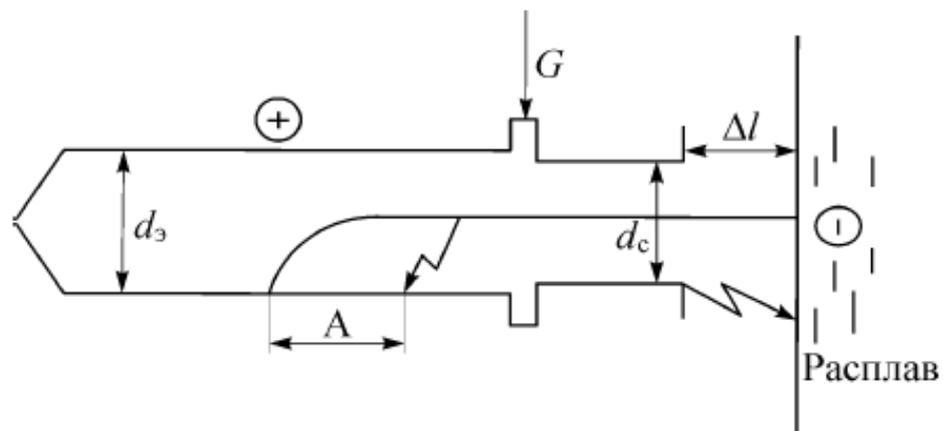


Рисунок 4.2 – Схема плазмотрона, работающего на гелии

С целью существенного сокращения длины электрода – анода был применен обратный уступ, то есть плазмообразующий газ поступает в анод через цилиндрический канал меньшего диаметра, чем $d_з$ (рисунок 4.2) для обеспечения

срыва потока газа за уступом. Этот приём позволил регулировать зону шунтирования дуги и управлять длиной дугового разряда.

На данную разработку плавильного плазмотрона был получен патент [93]. Плазмотрон данной конструкции позволяет нагревать различные газы (воздух, азот, гелий и др.) до высоких температур и может использоваться в плазмохимических, металлургических процессах, в частности, для выплавки ферросплавов, уничтожения техногенных отходов, а также в исследовательских целях. Плазмотрон работает на обратной полярности, так как анодное пятно, в отличие от катодного, имеет существенно большие размеры и малую подвижность, что существенно упрощает отслеживание и регулирование зоны выработки. Однако следует отметить, что с ростом величины расхода газа или уменьшением тока зона привязки дуги смещается глубоко внутрь анода. При этом дуговое анодное пятно может привязаться к донышку электрода, что приведёт к его очень быстрому прогоранию.

Свойства пароводяной плазмы, обозначенные в *I* главе и отличающие её от остальных плазмообразующих веществ, не позволяют применять её в данной схеме плазмотрона, так как стенки дуговой камеры при эксплуатации всегда достаточно холодные. Это приводит к конденсации водяного пара, что в свою очередь сопровождается взрывоиспарительными процессами и как результат приводит к низкому ресурсу всего устройства. Для избегания конденсации водяного пара стенки разрядной камеры плазмотрона необходимо поддерживать в подогретом состоянии, для чего было принято решение электроды выполнить составными (из медного и стального слоёв), с целью уменьшить отток тепла от внутренней поверхности электрода в охлаждающую воду.

Основу исследуемого однокамерного пароводяного плазмотрона составляют два полых составных трубчатых электрода ступенчатой геометрии, разделённых изолятором (рисунок 4.3). Толщина стальной обечайки δ выбрана по известной инженерной методике расчёта двухслойной стенки [94]. 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 составляли 1,5 и 1,8 соответственно, а длины l_1 и l_2 изменялись в процессе экспериментов. Кольцо закрутки расположено в термостойком изоляторе. На стадии запуска в плазмотрон поступает подогретый до 160°C воздух, затем – водяной пар с температурой $250 - 350^\circ\text{C}$.

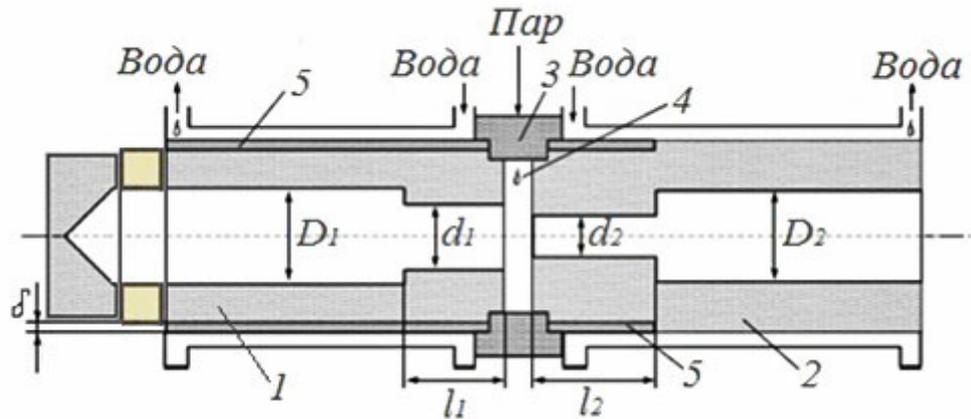


Рисунок 4.3 – Схема разработанного пароводяного плазмотрона; 1 – анод, 2 – катод, 3 – изолятор, 4 – кольцо закрутки, 5 – стальной слой

Чтобы исключить конденсацию пара на внутренних поверхностях электродов необходимо поддерживать температуру стенок разрядной камеры не ниже 100°C . С другой стороны, недопустимо превышать температуру стенки поверхности свыше 150°C , так как удельная эрозия в таком случае начинает стремительно расти (рисунок 4.4) [95]. Требуемый температурный режим достигается за счёт косвенного охлаждения медных электродов путём установки обечайки из нержавеющей стали на всей длине анода и на начальном участке катода. Остальная часть катода охлаждается непосредственно водой. За счёт низкой теплопроводности стали (~ 17 Вт/м·К), по сравнению с медью (~ 380 Вт/м·К), стальная обечайка теплоизолирует медный электрод, в результате чего и удаётся поддерживать температуру на заданном уровне.

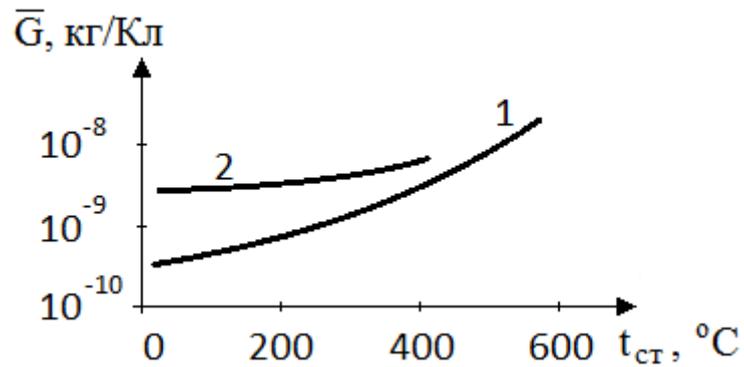


Рисунок 4.4 – Зависимость удельной эрозии медных цилиндрических электродов от температуры стенки; **1** – ступенчатый анод: $d_A = 26$ мм; $I = 300$ А; **2** – цилиндрический катод: $d_K = 26$ мм; $I = 120$ А

На рисунке 4.5 представлена фотография разработанного пароводяного плазмотрона, мощность которого регулируется в диапазоне $40 \div 100$ кВт. Подбирая наиболее рациональную длину внутреннего электрода-анода в процессе испытаний, между задней крышкой и корпусом плазмотрона устанавливалось соответствующее количество изолирующих вставок, что видно на фотографии.

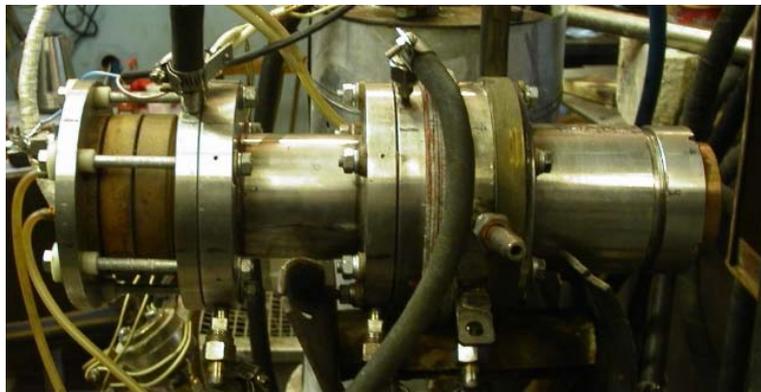


Рисунок 4.5 – Фотография разработанного пароводяного плазмотрона

Согласно определению, данному в паспорте «Электротехнология-05.09.10», а именно – электротехнологические комплексы и системы рассматриваются как самостоятельные объекты исследования и должны соответствовать по эффективности, безопасности и экономичности требованиям к техническим объектам, функциональными особенностями которых является

использование электротехнологических процессов, следует, что разработанный пароводяной плазмотрон следует считать электротехнологической системой для выполнения основной функции – нагрева рабочего вещества. В пароводяном плазмотроне, как электротехнологической системе должны быть реализованы внутренние функции: организация рабочего процесса и обеспечение работоспособности конструкции, включающие:

- а) формирование электрического дугового разряда;
- б) организация потока водяного пара и его взаимодействие с разрядом;
- в) отвод тепла, попадающего на стенки элементов конструкции;
- г) перемещение опорных пятен дугового разряда на электродах и тепловой режим электродов.

Перечисленные функции осуществляются соответствующими подсистемами плазмотрона: электрической; газовой; охлаждающей и технологической. Рассмотрим каждую из них более подробно.

4.1.1 Электрическая подсистема

Электрическая схема плазмотрона приведена на рисунке 4.6.

Силовое питание экспериментальной установки осуществляется от источника питания постоянного тока, собранного по схеме Ларионова, на базе повышающего трансформатора. Выпрямленное напряжение холостого хода источника составляет ≈ 1300 В, номинальный ток дуги ≈ 300 А.

Напряжение на трансформатор источника питания подаётся от сети ~ 380 В последовательным включением автомата *IA* и контактора *IK*. Автомат *IA* служит для защиты источника питания при токовых перегрузках, контактор *IK* – для отключения дуги в плазмотроне, так как по переменному току токовую нагрузку отключать легче, чем по постоянному. Балластный реостат *Rб* служит для обеспечения устойчивого горения дуги и регулирования силы тока разряда.

После включения контактора *IK* напряжение источника питания подаётся на верхние губки высоковольтного выключателя *BНП*. Вольтметр *VI* показывает напряжение холостого хода источника питания. Если вольтметр показывает

напряжение ≈ 1300 В, то можно продолжать дальнейшие действия по включению плазмотрона. При включении и отключении контактора *IK* на пульте, включается световая сигнализация. К верхним губкам *ВНП* подсоединён конденсатор (5 кВ, 40 мкФ). Он служит для защиты диодов источника питания от высокого напряжения осциллятора.

Кнопкой на пульте стенда «ВНП ВКЛ» включают *ВНП*, при этом на пульте загорается лампочка, сигнализирующая о включении *ВНП*, а над дверью в плазменный бокс загорается табло с надписью «НЕ ВХОДИТЬ». После включения *ВНП* через катушку осциллятора *Lсв* и токовое реле *РТ* на анод плазмотрона поступает отрицательный потенциал источника. Катодный потенциал источника поступает на катод плазмотрона через катушку индуктивности *L1* и добавочное сопротивление *Rдоб*. Пусковую дугу зажигают нажатием на пульте кнопки осциллятора *ОСЦ*.

В схеме питания плазмотрона предусмотрен контактор *КШ*. Он служит для шунтирования катушки токового реле *РТ* и вторичной обмотки трансформатора *Lсв* осциллятора *ОСЦ*. Контакт *КШ* включается блок – контактами токового реле при токе дуги 40А и становится своими блок – контактами на самоподпитку. При этом вторым блок – контактом *КШ* включает вольтметр *V2*.

Если дуга не подождлась или случайно отключилась в процессе эксперимента, то для повторного запуска нужно кнопкой ОТКЛ (на пульте стенда она обозначена КШ ОТКЛ) отключить контактор *КШ*. Если *КШ* не отключен, то запуск плазмотрона невозможен, так как высоковольтный импульс осциллятора замыкается контактором *КШ* и катушкой *РТ* опять же на катушку осциллятора и не поступает на плазмотрон.

Напряжение на дуге измеряют милливольтметром *V2* типа М105. Ток дуги измеряется милливольтметром *V3* типа М106, сигнал снимается с шунта 750А.

Регулировка тока дуги осуществляется балластным реостатом «труба в трубе» с протоком воды. Рабочий режим двигателя осуществляется включением

Включение *ВНП* осуществляется нажатием на пульте станда кнопки «*ВНП ВКЛ*» (рисунок 4.7). При этом включается пускатель *МП-2*, а он включает пускатель *МП-3*. Напряжение $\sim 380\text{В}$ поступает с *МП-3* на выпрямитель (тиристоры *T-1*, *T-2*, *T-3*). Тиристоры включены в режиме диодов. Далее ток поступает на катушку электромагнита *L1* включения исполнительного механизма *ВНП* и губки *ВНП* замыкаются. Ток катушки *L1* составляет 60А. После включения *ВНП* механически блокируется во включенном состоянии, одновременно контактом отключается *МП-2*, *МП-3* и катушка *L1* обесточивается. При включенном *ВНП* на пульте загорается сигнальная лампочка.

Отключение *ВНП* осуществляется кнопкой «*ВНП ОТКЛ*». Питание катушки электромагнита *L2* осуществляется источником питания (*Д1*, *Д2*, *Д3*). Электромагнит *L2* выбивает механическую блокировку, *ВНП* отключается. На пульте загорается сигнальная лампочка. *ВНП* готов к повторному включению.

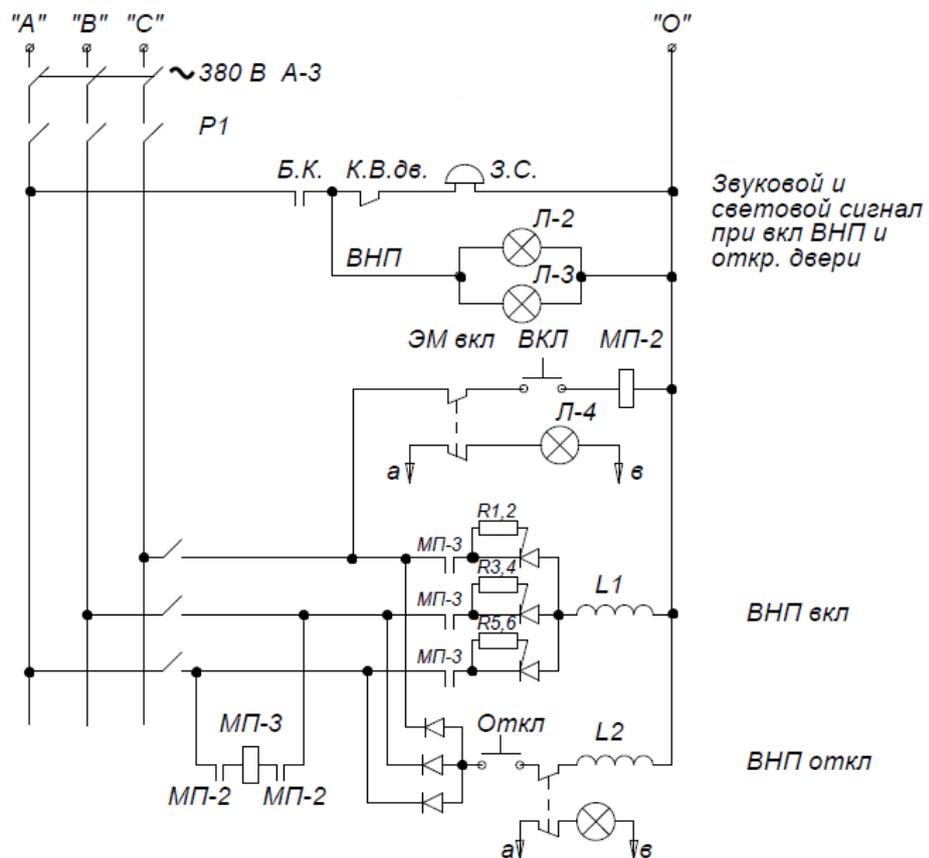


Рисунок 4.7 – Схема управления вкл/откл *ВНП*

При запуске плазмотрона подаётся сначала горячий воздух, затем горячий воздух + пар, далее пар. Пар имеет температуру на выходе из парогенератора $\approx 360^\circ\text{C}$. При такой температуре трубопровод к плазмотрону следует выполнять металлическим из нержавеющей стали, теплоизолированный стеклолентой ЛЭСБ. Поскольку трубы металлические, то при запуске плазмотрона высоковольтное и высокочастотное напряжение осциллятора может попасть на источники питания нагревателя воздуха и/или парогенератора и вывести их из строя. Поэтому в конструкции нагревателя воздуха предусмотрена электрическая развязка ЭР из текстолита. Аналогичная развязка имеется и в парогенераторе.

На рисунке 4.8 ИП₁ – источник питания воздухонагревателя, ВН – нагреватель воздуха, ВВП – выключатель высокого напряжения с видимым разрывом электрической цепи, ИП₂ – источник питания парогенератора, ПГ – парогенератор,  - термопара.

В схеме подачи пара предусмотрена вторая электрическая развязка. Её целесообразно разместить в непосредственной близости от плазмотрона и в ней поместить термопару для измерения температуры пара. Из зависимостей температуры пара от тока при разных его расходах (рисунок 4.10) следует, что источник питания, используемый для парогенератора, должен обладать тонкой регулировкой по току (± 1 А).

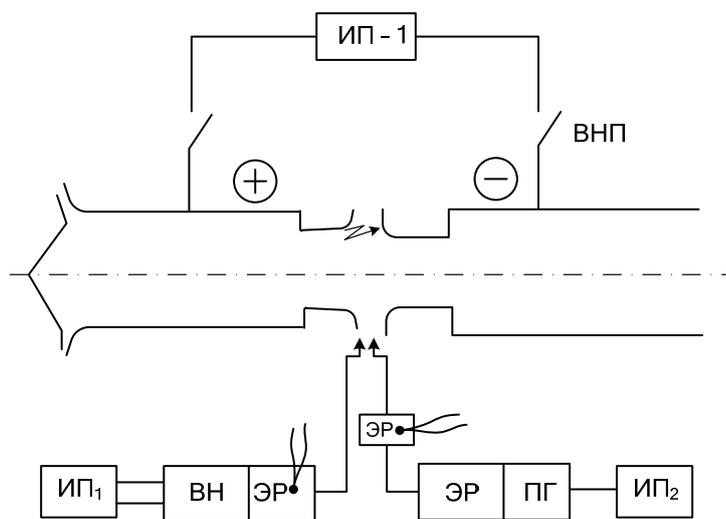


Рисунок 4.8 – Схема электропитания всего устройства

4.1.2 Газовая подсистема

Газовая система включает устройства для ввода плазмообразующего газа в разрядную камеру плазмотрона, придания потоку плазмообразующего газа в плазмотроне необходимой скорости и направления движения, ввода, каналы для транспортировки газа в плазмотроне, уплотнения, присоединительные устройства к внешним системам.

Схема газовой подсистемы плазмотрона представлена на рисунке 4.9. Верхняя её часть отображает принципиальную схему, предназначенную для нагрева воздуха до температуры 160°C . Она содержит компрессор K с давлением сжатого воздуха ≥ 6 атм; газгольдер G объёмом ≥ 100 литров, выдерживающий давление более 6 атм; вентиль $B1$, регулирующий расход газа; образцовый манометр M ; ротаметр РС-5 $P1$; нагреватель воздуха I ; источник питания $ИП$ для нагрева воздуха.

Нижняя часть отображает принципиальную схему, предназначенную для получения сухого перегретого пара. В схеме пароснабжения плазмотрона необходимы: вентиль $B2$ с тонкой регулировкой расхода воды; образцовый манометр M ; ротаметр типа РС-5 $P2$; парогенератор 2 ; источник питания $ИП$ с тонкой регулировкой тока; электрическая развязка 3 ; термopара T ; прибор для измерения температуры пара $П$; трёхходовый кран 4 . Все наружные трубы необходимо теплоизолировать керамической лентой ЛЭСБ. Стоит отметить, что для получения сухого перегретого пара в длительном режиме работы необходима дистиллированная или химически очищенная вода.

В первые 5-10 минут работы парогенератора, пока образованный пар не достиг требуемой температуры, его сбрасывают в вентиляцию 5 , либо в бак с дистиллированной водой, где он снова конденсируется и подаётся опять в парогенератор.

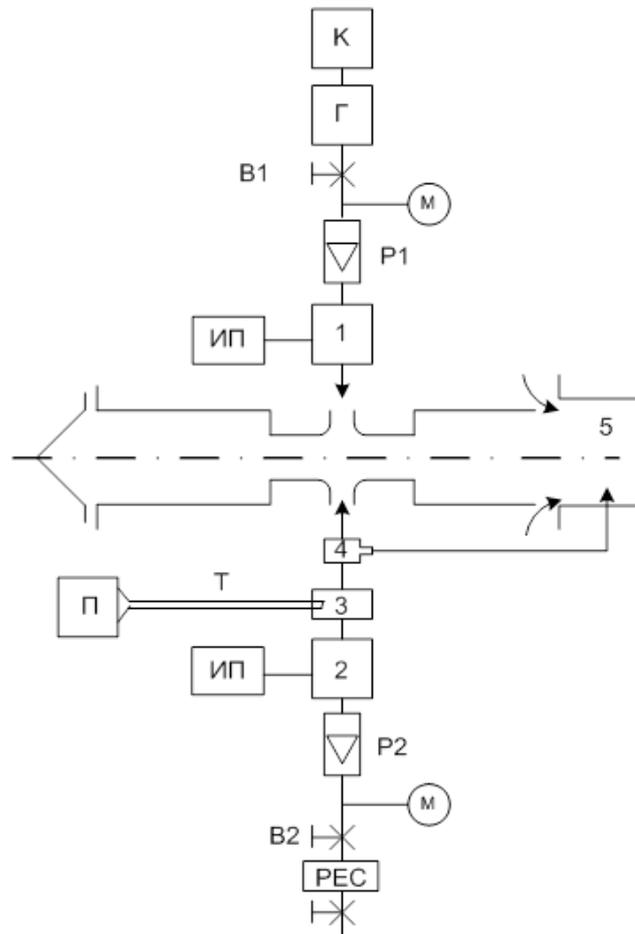


Рисунок 4.9 – Схема газовой подсистемы плазмотрона

4.1.2.1 Нагреватель воздуха

Использование нагревателя воздуха (рисунок 4.10) необходимо для подачи подогретого воздуха в газоразрядную камеру на начальном этапе работы плазмотрона. Нагреватель воздуха нужен для предварительного подогрева анода и косвенно охлаждаемой части катода, а также остальных менее термически нагруженных деталей плазмотрона.

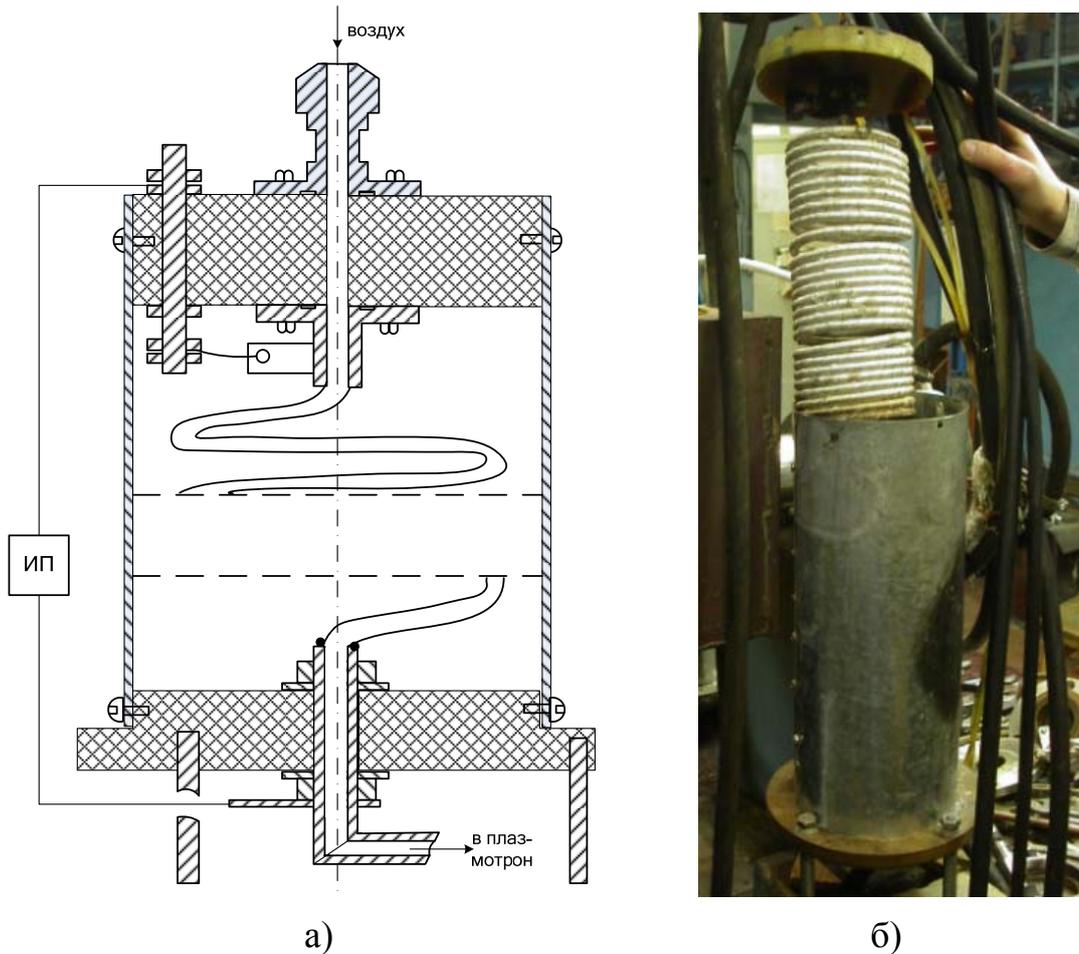


Рисунок 4.10 – Нагреватель воздуха: а) конструктивная схема; б) фотография

Разработка нагревателя воздуха исходила из ряда требований, таких как:

1) Применение конкретного типоразмера аппарата должно обеспечить передачу требуемого количества теплоты с получением требуемой конечной температуры носителя.

Исходными данными для расчёта нагревателя воздуха являются расход G_v и конечная его температура t_k . Необходимая мощность для нагрева заданного объёма воздуха N_v определяется как:

$$N_B = \frac{1}{\eta} \cdot G_B \cdot c \cdot (t_K - t_H), \quad (4.1)$$

где η – коэффициент полезного действия нагревателя воздуха (достаточно близок к единице), t_n , t_k – температура воздуха до и после нагрева;

2) При заданной тепловой нагрузке и других равных исходных параметрах теплоносителя аппарат должен иметь наименьшие габаритные размеры и наименьшую металлоёмкость, то есть процесс теплообмена должен протекать наиболее интенсивно;

3) Аппарат должен обладать определённым запасом прочности, гарантирующим его безопасную эксплуатацию при механических нагрузках, возникающих от давлений теплоносителей, вследствие температурных деформаций различных частей теплообменника, вибрации и т.п.;

4) Конструкция нагревателя воздуха должна предусматривать возможность проведения осмотров, ремонтов и т.п.

При проектировании нагревателя воздуха, тепловой расчёт сводится к определению необходимой поверхности теплообмена F при известных расходах, начальной и конечной температурах теплоносителей.

Скорость воздуха – теплоносителя должна обеспечивать благоприятное сочетание интенсивного переноса тепла и умеренного расхода энергии. При этом желательно, чтобы теплообмен происходил в условиях турбулентного режима течения ($Re \geq 10^4$) или близком к нему.

Основными расчётными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса.

В результате проделанных расчётов получаем, что воздух нагревается до требуемых температур, проходя через трубку из нержавеющей стали с внутренним диаметром 6 мм. Нагрев трубки осуществляется электрическим током. Ток может быть постоянным или переменным. Длина трубки выбирается, исходя из электрических параметров имеющегося источника питания с регулируемым током. Температура воздуха на выходе из нагревателя должна быть выше 160°C , а на входе в плазмотрон не ниже 160°C . Ток источника должен регулироваться, а температура воздуха контролироваться термопарой.

4.1.2.2 Парогенератор

Существующие в настоящее время парогенераторы сухого перегретого водяного пара в зависимости от типа движения в них рабочего тела – воды, подразделяются на парогенераторы с естественной циркуляцией воды и прямоточные трубчатые парогенераторы с принудительной её циркуляцией [96].

Парогенерация по первой схеме представляет собой двухстадийный процесс. Она предполагает наличие котла с кипящей водой и трубчатого пароперегревателя. Оба они оснащены индивидуальными источниками энергии и приборами контроля расхода пара, температуры пара на выходе из пароперегревателя и системой их регулировки. Схема сложна конструктивно, изобилует источниками утечек воды и пара и погрешностями измерений, а также очень инерционна при переходах на новые режимы работы.

Парогенераторы с принудительной циркуляцией воды обеспечивают одностадийный процесс парогенерации. Они могут содержать несколько параллельно работающих на общий коллектор парогенерирующих труб. Обладают большой мощностью и паропроизводительностью. При небольшой паропроизводительности достаточно одной единичной парогенерирующей трубы. К концу трубы герметично подсоединяется расширительный сосуд – демпфер, из которого сухой перегретый водяной пар направляется в паровихревой плазмотрон. Демпфер служит для сглаживания гидродинамических пульсаций, которые возникают на испарительном участке при работе парогенератора.

Условие для объёма демпфера, которому надо при этом удовлетворять:

$$V > \frac{G_n \cdot \tau_0}{\rho''}, \quad (4.2)$$

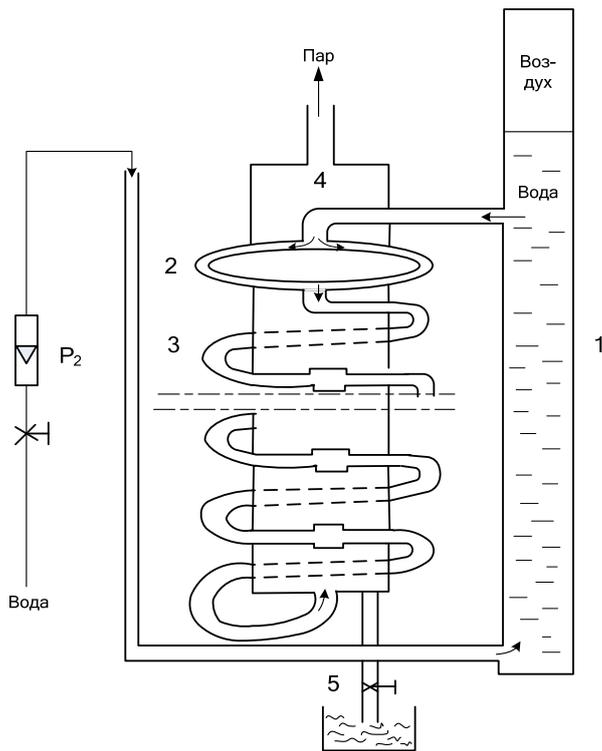
где G_n - массовый расход пара, τ_0 - период пульсации, ρ'' - средняя плотность пара в демпфере.

Период пульсаций τ_0 вычисляется по формуле, экспериментально полученной в работе [97]:

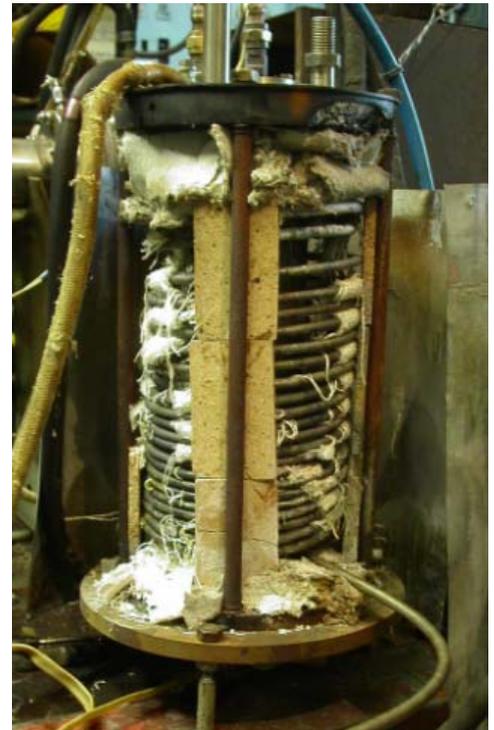
$$\tau_0 = 46 \cdot \frac{d_0^{1,5}}{G_n^{0,36} \cdot q^{0,72}}, \quad (4.3)$$

и проверенной в интервале изменения входящих в неё параметров: внутреннего диаметра $d_0 = 0,15 \div 0,8$ см, плотности теплового потока $q = 2,8 \div 49,5$ Вт/см², расход пара $G = 0,95 \div 3,25$ г/с при давлении порядка 10^5 Н/см².

Конструкция изготовленного нами трубчатого парогенератора проста (рисунок 4.11). Парогенерирующая труба с заданным зазором навивается в виде змеевика на вертикально стоящий демпфер. Зазор обеспечивается асбоцементными шайбами. Герметизация внутренних полостей парогенератора осуществляется с помощью фитинговых соединений, а электро- и теплоизоляция – с помощью деталей из асбоцемента, паранита, стеклотекстолита и т.п. материалов с повышенной жаростойкостью.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Парогенератор: а) конструктивная схема; б) фотография

Вода, проходя через ротаметр P_2 , поступает в первый демпфер 1 , далее в кольцо 2 , змеевик 3 , где превращается в пар. Змеевик имеет переменное сечение ($\varnothing 6 - \varnothing 8$). Затем вода из змеевика уже в виде пара попадает во второй, пока еще холодный, демпфер 4 , где в начальный период пар конденсируется в воду. Вода через сливную трубу и вентиль 5 стекает в ёмкость до тех пор, пока не исчезнут капли воды и будет истекать только пар ($T \geq 200^\circ\text{C}$). Это означает, что паровой демпфер 4 достаточно прогрелся. Далее открывают трёхходовой кран 4 (рисунок 2.9), а сливной кран 5 закрывают. С этого момента пар истекает в вентиляцию или в бак с дистиллированной водой. Переключение пара на плазмотрон осуществляется также трехходовым краном 4 .

Парогенераторы с принудительной циркуляцией воды для плазмотронов обладают самыми высокими техническими показателями: высоким удельным паросъёмом (количество вырабатываемого пара, отнесённое к 1 м^2 поверхности нагрева), наименьшими удельными затратами металла (затраты металла, отнесённое к 1 кг вырабатываемого пара), малыми габаритами, наивысшим КПД и др. Прямоточные промышленные парогенераторы снабжаются питательной водой путём подачи от специального насоса или с помощью гидроаккумулятора. По конструкции они проще, чем парогенераторы с естественной циркуляцией, надёжнее в работе, компактны, легко обеспечивают высокие давления и температуры, практически не имеют утечек воды и пара и т.д. Расход вырабатываемого пара определяется по расходу воды, что намного проще и точнее, чем по сухому перегретому пару.

В пользу прямоточного парогенератора свидетельствует ещё одно обстоятельство, связанное с источником нагрева. Им может служить джоулево тепло, выделяемое в стенках парогенерирующей трубы при пропускании по ней электрического тока.

Прямоточные парогенераторы чувствительны к качеству питательной воды. В их парогенерирующих трубах возможно образование накипи, приводящей к возможному перегреву труб. Для устранения этого нежелательного явления необходимо питательную воду предварительно химически обессолить.

Эта операция давно отработана на практике, а малый расход питательной воды в парогенераторах для плазмотронов обеспечивает низкий уровень энергозатрат на её проведение.

На основании сказанного схема парогенератора с принудительной циркуляцией для использования в системе жизнеобеспечения паровихревого плазмотрона оказывается более предпочтительной. Поэтому она и была выбрана и реализована на практике.

Согласно предварительным исследованиям во избежание появления конденсационных пульсаций в электродуговой камере пароводяного плазмотрона температура сухого перегретого пара на входе в плазмотрон должна на 50 – 150 °С быть выше температуры насыщенного пара. Это одно из главных условий стабильной работы дугового плазмотрона для нагрева водяного пара.

Другим не менее важным условием является отсутствие пульсаций расхода пара на входе в плазмотрон. Исследование явления пульсирования пара в парогенерирующих трубах как одиночных, так и параллельно расположенных, используемых в мощных парогенераторах посвящено значительное число работ [98-100]. В них рекомендуется для подавления пульсаций установка в трубах местных сопротивлений в виде гидравлических шайб, поворотов и т.д., а на выходе – мощного дросселирования пара.

В нашем случае расход питательной воды устанавливается с помощью игольчатого вентиля и ротаметра высокого давления. Температура пара определялась хромель-копелевой термопарой, установленной в специальном блоке ЭР (рисунок 4.8).

В системе парогенератора предусмотрен фильтр, установленный на входе в демпфер и предназначенный для задержания инородных включений и предотвращения засорения тангенциальных отверстий в кольце закрутки плазмотрона.

Источниками электропитания парогенератора могут служить регулируемые источники постоянного либо переменного тока по мощности и

вольтамперному соотношению, отвечающие электрическому сопротивлению змеевика парогенератора.

Исходными данными для расчёта парогенератора являются производительность по пару G_c и конечная его температура t_k . Мощность парогенератора N_n определяется как:

$$N_n = \frac{1}{\eta} \cdot G_c \cdot \left[c' (t_s - t_c') + r + c'' (t_k'' - t_s) \right], \quad (4.4)$$

где η - коэффициент полезного действия парогенератора. Он достаточно близок к единице.

Из экспериментально найденного критерия Рейнольдса:

$$\text{Re}_x \equiv \frac{\sigma \cdot \rho'}{\mu'' \cdot V_m} = 215 \div 11000. \quad (4.5)$$

Определяем объём демпфера:

$$V_m \equiv \frac{\sigma \cdot \rho'}{\mu'' \cdot \text{Re}_x}, \quad (4.6)$$

проходное сечение парогенераторной трубки:

$$S_0 = \frac{G_c}{\rho' \cdot V_m} \quad (4.7)$$

и её диаметр:

$$d_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_0}{\pi}}. \quad (4.8)$$

Далее следует определить плотность теплового потока q из экспериментальной формулы:

$$K_1 \equiv \frac{q}{r \cdot V_m} = (2.6 \div 7.2) \cdot 10^{-4}, \quad (4.9)$$

как:

$$q = K_1 \cdot r \cdot V_m, \quad (4.10)$$

и определить погонную мощность тепловыделения парогенерирующей трубки и её длину:

$$N_{nm} = q \cdot \pi \cdot d_0, \quad (4.11)$$

$$L_n = \frac{N}{N_{nm}}. \quad (4.12)$$

Затем, задавшись толщиной δ стенки нержавеющей трубки найти погонное и полное её сопротивление:

$$R_{nm} = \frac{\rho_{yd}}{\pi \cdot \delta \cdot (d_0 \cdot \delta)}, \quad (4.13)$$

$$R_n = R_{nm} \cdot L_n, \quad (4.14)$$

а также ток и напряжение на парогенераторе:

$$I = \sqrt{\frac{N_{n2}}{R_{n2}}}, \quad (4.15)$$

$$U_{n2} = I \cdot R_{n2}. \quad (4.16)$$

4.1.3 Охлаждающая подсистема

Подсистема охлаждения включает: рубашки охлаждения теплонапряжённых элементов конструкции, каналы для организации потока охлаждающей среды, уплотнения, присоединительные элементы к внешней системе отвода тепла.

Схема подсистемы охлаждения пароводяного плазмотрона представлена на рисунке 4.12. Измерение и регулирование расходов воды, подаваемой на охлаждение электродов плазмотрона, производятся ротаметрами типа РС-7 (Р1, Р2 и Р3) и образцовыми манометрами (*М1*, *М2*, *М3* и *М4*). Погрешность измерений расходов составляет $\pm 2,5\%$. Охлаждение электродов осуществляется обратной технической водой.

Внутренний медный электрод-анод охлаждается водой косвенно через стальную обечайку. Толщина стальной обечайки в таком случае должна быть

заложена такой, чтобы в рабочем режиме плазмотрона исключалась возможность образования конденсата внутри рабочей камеры.

Начальная часть выходного электрода-катода также охлаждается косвенно через стальную обечайку, при этом остальная наружная поверхность катода за уступом, как и задняя крышка плазмотрона, отделённая от анода изолятором охлаждается непосредственно водой.

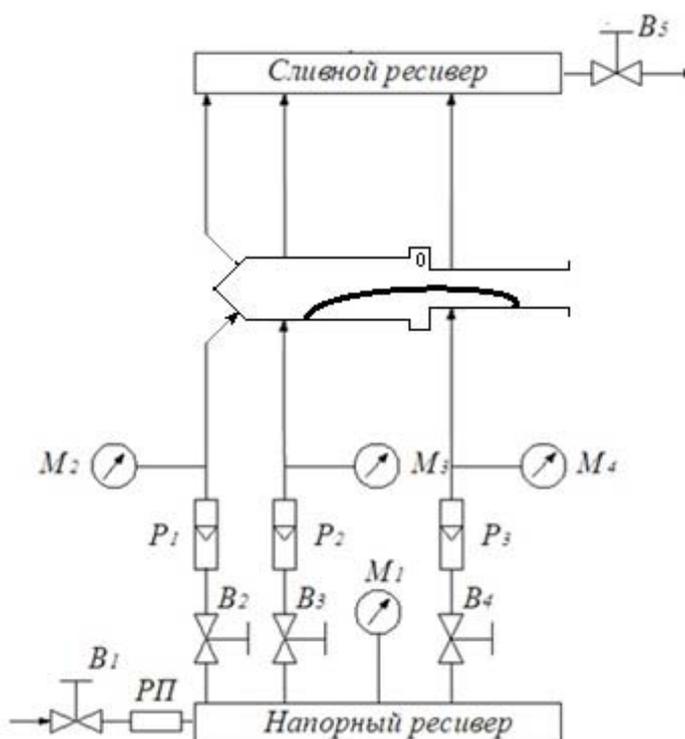


Рисунок 4.12 – Схема подсистемы охлаждения плазмотрона

4.1.4 Технологическая подсистема

В отдельных случаях может быть предусмотрена технологическая подсистема, включающая например: сопло на выходе; устройства ввода в поток плазмы порошка или проволоки; технологического защитного газа; топлива и др. — для технологических плазмотронов определённого назначения.

В нашем случае технологическая подсистема отсутствует.

4.2 Электрические характеристики

К этим характеристикам относятся сила тока разряда I и падение напряжения на дуге U в зависимости от геометрических размеров разрядной камеры, температуры, расхода и давления пара, а также семейство вольтамперных характеристик разряда (ВАХ), определяющие требования к источнику электропитания.

В экспериментах плазмотрон сначала запускался на воздухе, а затем осуществлялся поэтапный переход на водяной пар: расход пара увеличивали, а расход воздуха снижали. Эксперименты показали, что при переходе от воздуха к пару напряжение на дуге резко возрастает при небольшом расходе пара (0,6 – 0,7 г/с) (рисунок 4.14). Далее напряжение на дуге с уменьшением расхода воздуха и увеличением расхода пара возрастает значительно медленнее (суммарный расход плазмообразующего газа оставался примерно постоянным).

Средняя по длине дуги напряжённость поля составила 18-20 В/см. Это значение соответствует экспериментальным данным по напряжённости электрического поля дуги в водяном паре, полученным в плазмотроне с термокатодом [90]. Поскольку плотность водяного пара ниже плотности воздуха, при одинаковых температурах, то в смеси с воздухом пар располагается в приосевой области канала плазмотрона и дуга горит преимущественно в паре.

На рисунке 4.13 для сравнения приведены вольтамперные характеристики дуги при работе плазмотрона на (кривая 1) и на водяном паре (кривая 2).

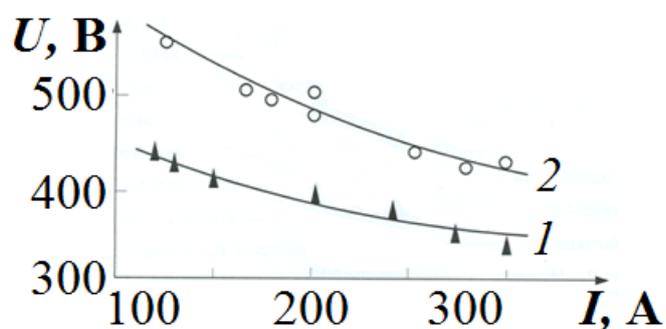


Рисунок 4.13 – Вольтамперные характеристики дуги при $G = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Если судить по следам выработки электродов при горении дуги на воздухе, смеси воздуха с паром и на паре, то установлено, 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 выше и составляет 30 В/см и более.

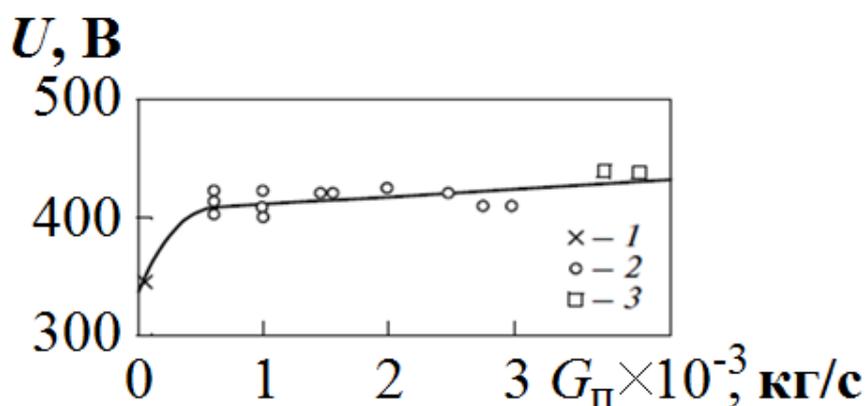


Рисунок 4.14 – Изменение напряжения на дуге при переходе от плазмообразующего воздуха (1) и паровоздушной среды (2) к водяному пару (3) при токе дуги около 200А, $G = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с

На рисунке 4.15 представлено семейство вольтамперных характеристик дугового разряда плазмотрона при различном расходе плазмообразующего газа – водяного пара. Видно, что ВАХ дуги имеют падающий вид, с ростом расхода пара напряжения на дуге возрастает. Как известно, плазмтроны с гладким трубчатым электродом имеют только падающие вольтамперные характеристики [101]. Объясняется это тем, что на восходящей ветви Е-І характеристике падение напряжения с ростом тока из-за сокращения длины дуги в результате крупномасштабного шунтирования происходит быстрее, чем возможный прирост напряжения за счёт роста напряжённости.

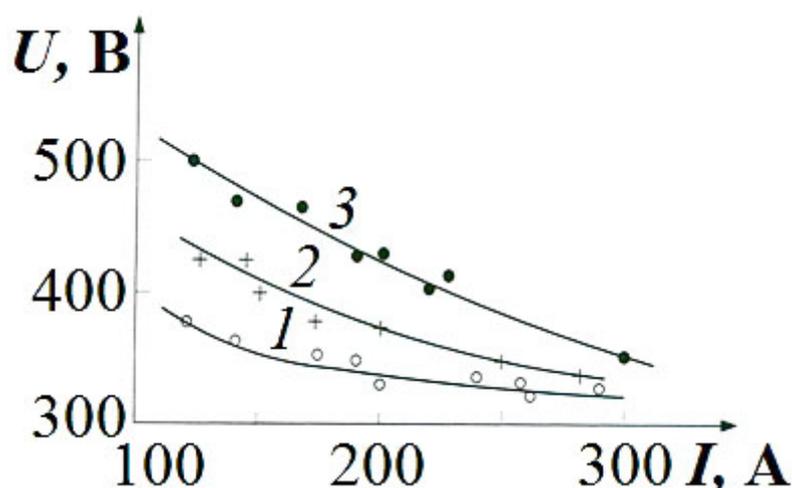


Рисунок 4.15 – Семейство ВАХ дуги в зависимости от расхода плазмообразующего газа: 1 - $3 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 - $4 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3 - $5 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Экспериментальные данные, как и для других плазмообразующих сред, обобщаются в критериальном виде по методике [101] следующим образом:

$$U = 2280 \cdot \left(\frac{I^2}{G_n d_2} \right)^{-0,17} \cdot \left(\frac{G_n}{d_2} \right)^{0,2} \cdot (p d_2)^{0,25}, \quad (4.17)$$

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%.

4.3 Энергетические характеристики

Плазмотрон с внутренним разрядом как источник плазмы характеризуется температурой T и давлением p плазмы на выходе из плазмотрона [13]. При этом обычно имеют в виду среднюю по сечению (среднемассовую T_{CM}) температуру плазмы. В ряде случаев представляет интерес распределение температуры по сечению и её локальные значения, например максимальная температура T_{\max} или температура на оси струи. Обычно в выходном сечении плазмотрона имеет место

термодинамическое равновесие, так что температура плазмы и давление с достаточной точностью характеризуют состав плазмы. В этом случае состав плазмы или степень её ионизации могут быть найдены с помощью таблиц теплофизических свойств веществ. Характеристикой плазмы может быть и энтальпия h нагреваемого газа, также связанная с температурой и давлением. В некоторых случаях в качестве характеристики плазмы может указываться концентрация заряженных частиц в плазме n_e , n или степень ионизации $\alpha < 1$.

Тепловая мощность струи плазмы P_{men} характеризуется расходом газа G :

$$P_{men} = hG. \quad (4.18)$$

Поскольку полезная тепловая мощность является частью мощности, подведённой к плазмотрону, зависящей от КПД преобразования η , связь между основными характеристиками плазмотрона можно представить в следующем виде:

$$P\eta = hG, \quad (4.19)$$

где P - электрическая мощность, подведённая к плазмотрону.

КПД плазмотрона характеризует совершенство преобразования подведённой энергии в энергию струи плазмы:

$$\eta = \frac{P_{men}}{P} = \frac{P - P_{nom}}{P}, \quad (4.20)$$

где P_{nom} - потери мощности в элементах конструкции.

Характеристики плазмы и производительности позволяют определить мощность, необходимую для генерации плазмы на выходе из плазмотрона.

Измерения тепловых потоков в электроды калориметрическим методом показали, что основные потери тепла приходятся на выходной электрод-катод (рисунок 4.16). Представленные данные были сняты при расходе плазмообразующего газа – водяного пара $G \approx 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

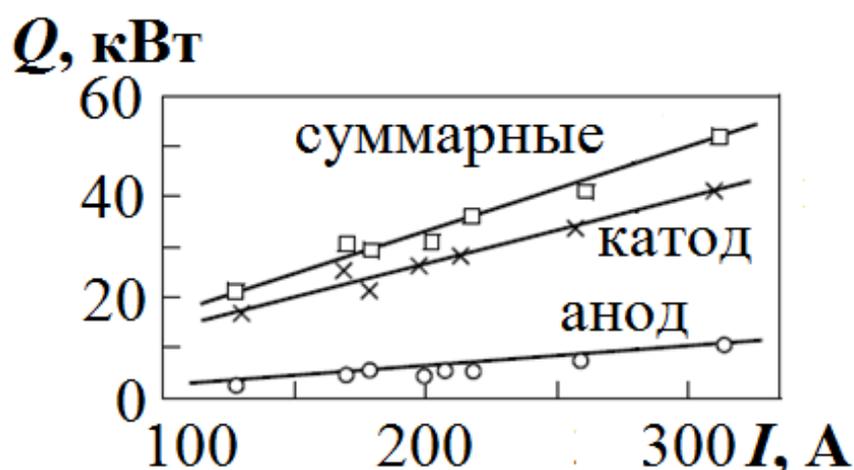


Рисунок 4.16 – Зависимость потерь тепла в электроды от тока дуги

Используя данные из полученного семейства ВАХ дуги (рисунок 4.15), потерь тепла в электроды (рисунок 4.16) и формулу (4.19) можно получить следующие зависимости (при расходе плазмообразующего газа $G \approx 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с): КПД плазмотрона и энтальпии его плазменной струи.

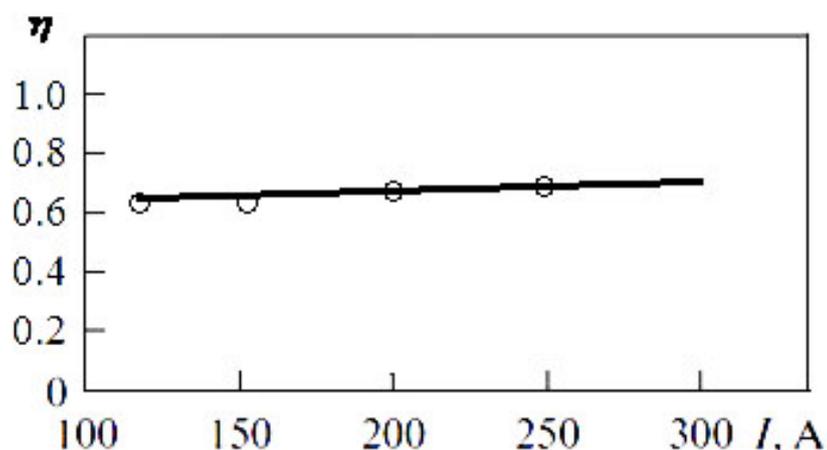


Рисунок 4.17 – КПД плазмотрона

Кривая, описывающая зависимость КПД от силы тока дуги, имеет почти неизменный характер. Это объясняется тем, что пропорционально росту мощности вкладываемой в дугу резко начинают расти тепловые потери на катоде и аноде, что в свою очередь никак не сказывается на общем КПД плазмотрона.

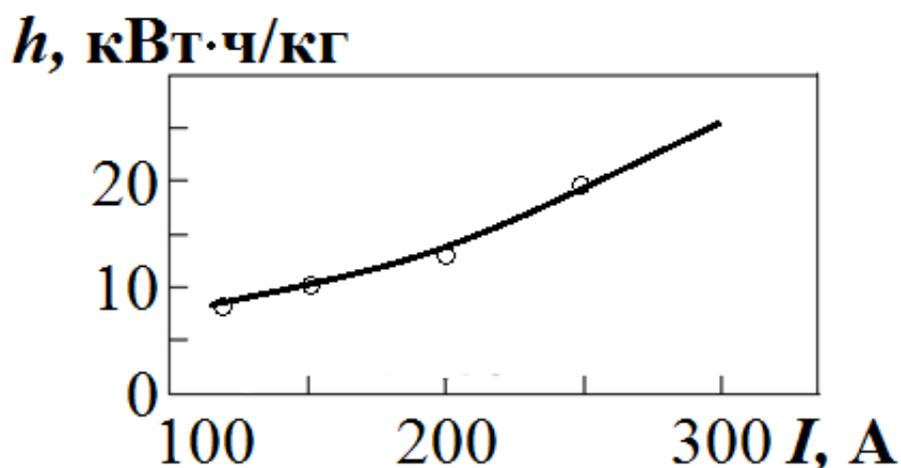


Рисунок 4.18 – Зависимость энтальпии плазменной струи от тока дуги

Использование высокоэнтальпийных молекулярных плазмообразующих газов в энергетическом отношении более выгодно, так как они при более низких температурах обладают той же тепловой эффективностью, что и одноатомные газы. При этом в целом уменьшаются потери тепла на излучение в стенки плазмотрона и в окружающую среду (эти потери пропорциональны четвертой степени температуры).

4.4 Эксплуатационные характеристики

К этим характеристикам относятся [13]: охлаждающая среда – вода, воздух, их расход через элементы конструкции плазмотрона и суммарный расход, $G_{ох}$, кг/с, давление охлаждающей среды на входе в плазмотрон, $p_{ох}$, Па; ресурс основных элементов конструкции – катода, анода; расход защитного газа (при необходимости) в кг/с.

Также могут быть представлены и другие характеристики, связанные с технологическим процессом, например расход технологической среды (жидких отходов), подаваемых непосредственно в плазмотрон.

Все характеристики плазмотрона определяются принятыми техническими решениями при проектировании плазмотрона.

4.4.1 Эрозия электродов

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 ($10^8 - 10^9$ Вт/м²), что происходит разрушение материала электродов [95].

Несмотря на обилие работ, посвящённых приэлектродным процессам, до сих пор нет единого мнения о механизме эрозии электродов. Тем не менее, большинство исследователей считают, что основной причиной разрушения электродов в контрагированном разряде является термическое воздействие опорных пятен. Не подлежит сомнению также, что перенос тока на «холодный» катод осуществляется через множество микропятен, быстро перемещающихся по его поверхности.

Кроме скачкообразного перемещения, в цилиндрических электродах может реализовываться устойчивое равномерное и непрерывное движение пятна по поверхности электрода. Это имеет место, например, во внутреннем цилиндрическом катоде в воздушной среде при умеренных значениях тока. Причём при равномерном и непрерывном движении пятна эрозия катода ниже, чем при скачкообразном. К настоящему времени сложилось мнение, что катодное пятно на холодных электродах представляет собой макропятно, состоящее из множества кратковременно существующих микропятен с плотностью тока более 10^5 А/см². Общая площадь следов микропятен на поверхности металла может составлять около 10^{-3} площади, занятой макропятном. Отмечается также, что катодные струи распадаются на отдельные струи, имеющие прерывистый характер. Большая скорость газа в струе ($\approx 10^4$ м/с) и её структура показывают, что пары, которые создают струи, движутся со сверхзвуковой скоростью и достигают противоположной стенки электрода.

Вопросы влияния температуры электродов на величину их удельной эрозии часто возникают при конструировании электродуговых устройств. В реальных условиях существует предварительный подогрев массы цилиндрического электрода за счёт предыдущих пробега макропятна по его

кольцевой поверхности. Подогрев тем больше, чем хуже охлаждение электрода. Повышение температуры электродов должно приводить к росту их эрозии. В [102] описаны результаты экспериментов по определению влияния усреднённой во времени температуры электрода в кольцевой зоне привязки дуги на величину удельной эрозии. Получен однозначный результат: чем больше температура тела электрода, тем выше его удельная эрозия (рисунок 4.3).

Увеличение температуры рабочей поверхности происходит также за счёт изменения структуры его материала во время работы плазмотрона. Это обусловлено многократными ($\approx 100 \text{ с}^{-1}$) ударными тепловыми нагрузками на поверхность металла от движущегося макропятна. Изучение микрошлифов медных катодов в зоне эрозии подтвердило, что во время работы электрода в его приповерхностной зоне образуется обширная сеть микротрещин [103]. Глубина отдельных трещин через 4 ч может достигать 0,4 мм. Вследствие этого ухудшается теплоотвод от движущегося макропятна, так как падает эффективное значение теплопроводности, соответственно возрастает температура поверхности электрода и увеличивается его эрозия. Кроме того, уменьшение теплопроводности по мере растрескивания металла и углубления трещин снижает время прогрева металла под микропятнами и это приводит к тому, что в первые часы работы плазмотрона быстро увеличивается эрозия его электродов. Что и наблюдается в экспериментах (рисунок 4.19).

С другой стороны, повышение температуры электрода увеличивает пластичность его материала, что до некоторой степени должно уменьшать интенсивность растрескивания его поверхности и приводить к снижению плотности тока в пятне дуги и эрозии электрода. В связи с этим возникает предположение о существовании некоторой оптимальной температуры, обеспечивающей минимальную эрозию катода. Однако это не подтвердилось в экспериментах, описанных в литературе.

В нашем случае в ходе экспериментов степень эрозии электродов определялась методом взвешивания до и после испытаний. Для взвешивания электродов использовались поверенные лабораторные весы ВЛР – 1. Результаты

исследований приведены в таблице 4.1. Для описания эрозионной характеристики электродов введён параметр \bar{G} – удельная эрозия электрода, кг/Кл:

$$\bar{G} = \frac{\Delta m}{I \cdot t}, \quad (4.21)$$

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

Таблица 4.1 – Результаты замеров массы электродов

Длительность работы	Δm анода, г	Δm катода, г
18 мин	0,1	0,0
26 мин	0,2	0,1
40 мин	4,5	1,3
54 мин	10,1	4,7
70 мин	14,5	5,6
97 мин	17,8	7,8
152 мин	23,7	9,3

На рисунке 4.19 приведены экспериментальные данные по \bar{G} (при силе тока дуги 180÷200 А) для анода (значения \bar{G} для катода располагаются несколько ниже – в диапазоне 10^{-9} ÷ 10^{-8} кг/Кл).

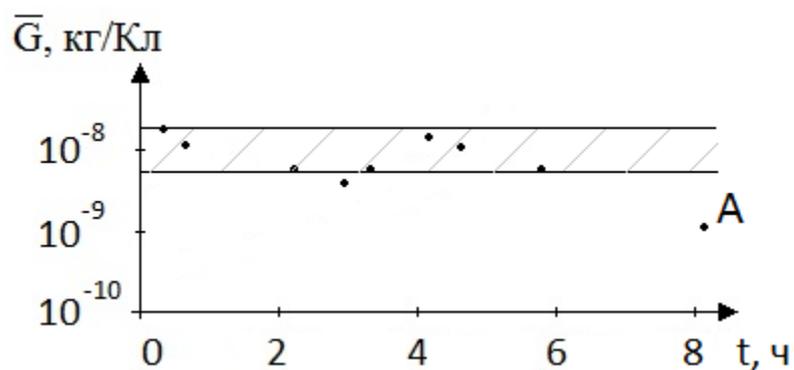
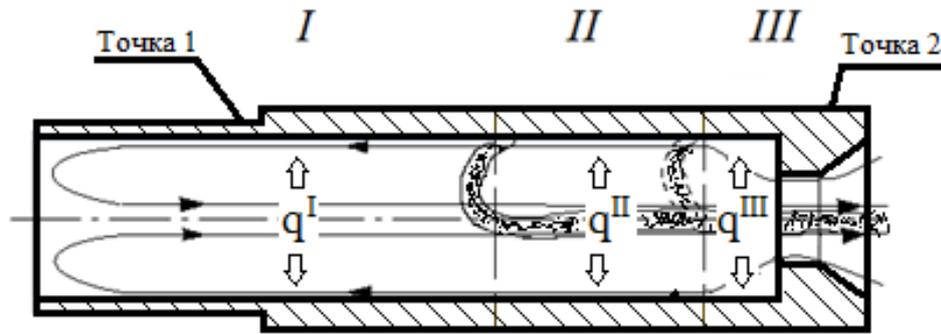


Рисунок 4.19 – Эрозионные характеристики электродов

Изменение системы охлаждения стальной обечайки (о чём будет сказано далее) за счёт её профилирования сказалось на величине \bar{G} (см. точку А, $\bar{G}_A = 1,7 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл).

Анализ рельефности электродов указывает на то, что электроды разрушаются практически только в зоне горения дуги, в так называемой зоне выработки электрода. Длина зоны выработки электрода – анода в нашем случае имеет очень малую длину. Она зависит от многих параметров и чтобы проследить, необходимо пользоваться в основном двумя способами: обмер следов, оставляемых движущейся дугой либо регистрацией области интенсивного свечения в камере плазмотрона. Для движущейся дуги практически единственным является способ обмера следов. Если дуга оставляет на электроде прерывистые следы, то существуют стадии образования пятна и прекращения горения дуги в пятне. Эти стадии не могут быть прослежены в рамках данного метода.

Для электрода – анода, визуально, распределение теплового потока в стенку по длине можно разделить на три зоны: I – зона минимальных тепловых потоков, II – зона максимальных тепловых потоков, III – зона входа и истечения нагретого газа (рисунок 4.20а)) [104-106].



а)



б)

Рисунок 4.20 – Электрод-анод: а) конструктивная схема; б) фотография

Зона I. В этой зоне рабочая среда – водяной пар движется вдоль электрода у его стенки и возвращается обратно по его оси (на рисунке 4.20а) движение водяного пара отмечено стрелками). Тепловой поток в стенку *I* состоит лишь из конвективного теплового потока:

$$q^I = q_K^I. \quad (4.22)$$

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 пришлась именно на эту малую область поверхности электрода, а большая поверхность электрода осталась не задействованной. Здесь к тепловому потоку от горячего газа 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:

$$q^{II} = q_K^{II} + q_L^{II} + q_Z^{II}, \quad (4.23)$$

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 нагретое плазмообразная рабочая среда движется в противоположном направлении электрода. Таким образом, тепловой поток в стенку области *III* состоит:

$$q^{III} = q_K^{III} + q_L^{III}. \quad (4.24)$$

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 ходе экспериментов были сделаны замеры тепловых потерь в стенку на электроде – аноде калориметрическим методом, которые составили в среднем 5 кВт. Стоит отметить, что для калориметрического метода определения тепловых потерь неважно, какую физическую природу имеют тепловые потоки в стенку электрода: конвективную, кондуктивную или лучистую.

С помощью установления хромель – алюмелевых термопар, установленных в указанные места («точки 1 и 2» рисунок 4.20а)) были сняты значения температур в определённые промежутки времени. Полученные значения отображены в таблице 4.2. Реальная температура внутри рабочей камеры, как оказалось, сильно отличается от прогнозируемой изначально. Внутренний электрод-анод эксплуатировался в крайне нежелательном для него режиме, что и привело к его повышенной удельной эрозии. Однако, полученные данные послужат ценными исходными данными, для дальнейшего теоретического поиска

условий, при которых электрод-анод будет эксплуатироваться в оптимальном режиме.

Таблица 4.2 – Экспериментально снятые значения величин температур

Время, мин	Точка 1, °С	Точка 2, °С
5	125	266
10	101	269
15	75	286
20	72	297
25	72	254

На основании полученных данных в первом приближении можно сделать вывод, что в зону *II* и *III* поступает около 85 % тепла, которое впоследствии передаётся охлаждаемой воде, а остальные 15 % тепла поступают в стенку электрода, соответствующую зоне *I*.

4.5 Численное моделирование распределения температурного поля в электроде – аноде в ПК ANSYS

Разработка требуемой конструкции составного трубчатого электрода с минимальной эрозией является сложной инженерной задачей [76-82]. Для её успешного решения необходимо знать параметры рабочего режима плазмотрона, которые зависят от многих факторов, а именно: от расхода рабочей среды – водяного пара в рабочую камеру плазмотрона; от расхода охлаждающей жидкости, подаваемой на корпус плазмотрона; от формы охлаждающей поверхности электрода; от вводимой мощности дуги.

Одной из основных целей проведения теплового расчёта является отыскание оптимальных условий охлаждения медного электрода, при которых достигается на всей его рабочей внутренней поверхности температура в диапазоне 100 – 150 °С. Как уже было отмечено, с повышением температуры

медной поверхности выше 150 °С удельная эрозия электрода значительно возрастает, поэтому задача фиксирования температуры на поверхности внутренней стенки электрода в достаточно узком диапазоне 100 – 150 °С будет определять длительность эксплуатации электрода.

Интерфейс ANSYS, при создании модели, позволяет легко и эффективно назначать материалы и их свойства различным областям (слоям) конструкции. ANSYS предлагает большую библиотеку конечных элементов, которые созданы с различными конкретными свойствами и путём выбора легко могут использоваться для создания желаемой модели. Также на выбор пользователя предлагается большой набор нагрузок для задания граничных условий (в нашем случае граничных условий два: 1 – тепловой поток, который поступает в стенку от дугового разряда; 2 – конвекция, которая создаётся охлаждающим водяным потоком на внешней поверхности электрода). Для определения граничных условий, необходимо знать следующие исходные данные: это в первую очередь геометрические размеры электрода; коэффициент теплоотдачи, который обеспечивается подачей охлаждающей жидкости на внешнюю поверхность электрода; распределение тепловых потоков на внутренней поверхности рабочей камеры. Все эти данные получены экспериментальным путём.

Решатели ANSYS обеспечивают основу для получения высокоточных результатов анализа, используя которые можно получить оптимальные параметры конструкции электрода.

На рисунке 4.21 представлена геометрическая модель и наложенная на неё сгенерированная сетка. В силу осесимметричности модели построение её возможно осуществлять в двухмерной постановке. В данном случае применялось контролируемое разбиение. Контролируемое разбиение поверхности содержит четырёхугольные элементы и содержит регулярную сетку с равными рядами элементов. Контроль разбиений позволяет установить такие факторы, как форма элементов, расположение срединных узлов и размер элементов. Этот шаг является одним из наиболее важных, которые влияют на точность и экономичность решения.



Рисунок 4.21 – Модель электрода и сгенерированная сетка

Математическая формулировка задачи: в заданной области исследования D требовалось определить функцию распределения температуры, удовлетворяющую уравнению теплопроводности

$$\operatorname{div}[\lambda(t)\operatorname{grad} t] = c(t)\rho \frac{dt}{d\tau} \quad (4.25)$$

и начальному условию

$$t|_{\tau=0} = 20^{\circ}\text{C}. \quad (4.26)$$

Краевые условия на различных границах следующие (рисунок 2.23):

$$\lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_0; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = 0 \text{ на } \Gamma_1; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_2; \quad (4.27-4.29)$$

$$\lambda \frac{dt}{dy} = \alpha_1(t - t') \text{ на } \Gamma_3; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_4; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = 0 \text{ на } \Gamma_5; \quad (4.30-4.32)$$

$$\lambda \frac{dt}{dx} = 0 \text{ на } \Gamma_6; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = q_1 \text{ на } \Gamma_7; \quad \lambda \frac{dt}{dy} = q_2 \text{ на } \Gamma_8; \quad (4.33-4.35)$$

$$\lambda \frac{dt}{dy} = q_3 \text{ на } \Gamma_9; \quad \lambda \frac{dt}{dx} = q_3 \text{ на } \Gamma_{10}. \quad (4.36-4.37)$$

Здесь t – температура; λ – коэффициент теплопроводности; $c(t)$ – удельная теплоёмкость; ρ – плотность материала; q_1 , q_2 , и q_3 – тепловые потоки на границах Γ_7 , Γ_8 , Γ_9 и Γ_{10} ; α_1 – коэффициент теплоотдачи на поверхности охлаждения; t' – температура охлаждающей воды.

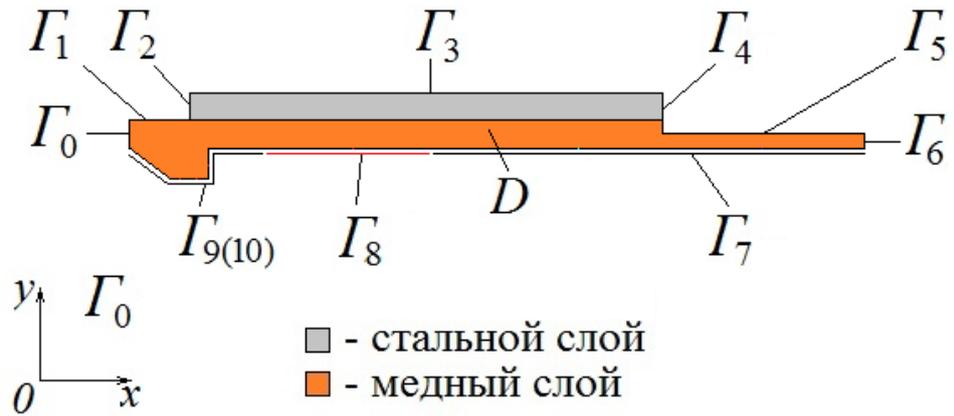


Рисунок 4.22 – Наложение граничных условий

На рисунке 4.23 представлено численное решение модели составного электрода, на котором непосредственно проводились эксперименты. На представленном рисунке цветом выделена узкая зона, температура которой соответствует диапазону 100 – 150 °С. Как уже было отмечено, зона выработки в таком случае слишком мала и данный вариант конструкции электрода совместно с используемым режимом эксплуатации не приемлем из-за малого ресурса, что и подтвердилось на опыте. Эрозия его слишком велика (рисунок 4.19), а срок работы данного электрода недостаточен для технологических применений. Изменять электрические параметры режима или расход рабочей среды – водяного пара для того чтобы увеличить длину зоны выработки нежелательно, так как это приведёт к изменению теплосодержания плазменной струи. К изменяемым параметрам следует отнести геометрию конструкции электрода и режим охлаждения его внешней поверхности.

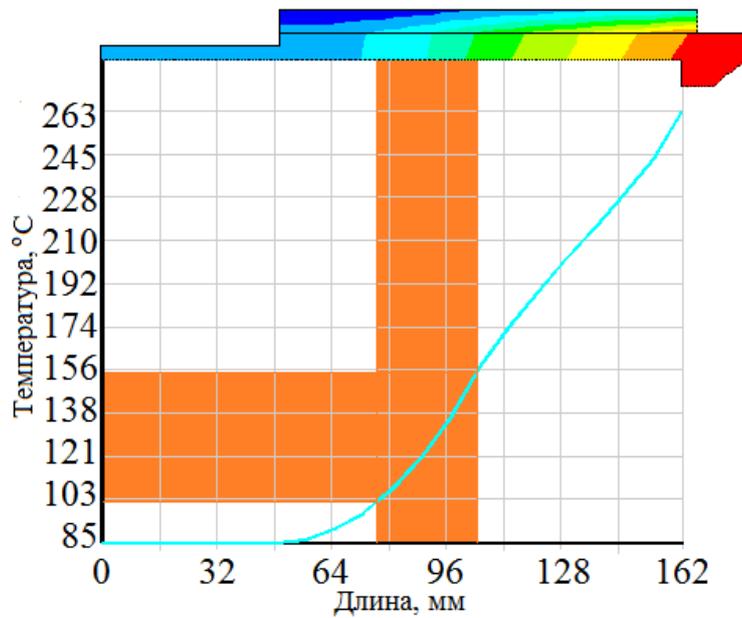


Рисунок 4.23 – Тепловое распределение в электроде – аноде

Рассмотрим некоторые из предлагаемых конструкций для решения данной задачи.

На рисунке 4.24 представлен случай, когда внешний слой является составным. Для более нагруженной области, соответствующей зонам *II* и *III*, материал внешнего слоя подобран из алюминия, а в менее нагруженной области, соответствующей зоне *I* – материал выбран из нержавеющей стали. Коэффициент теплопроводности алюминия больше, чем у стали, соответственно это обеспечивает более интенсивный отток тепла к охлаждающей воде и как следствие, обеспечивает сравнительно меньшую температуру на внутренней стенке электрода. Зауживание зазора в рубашке охлаждения, также в итоге приводит к уменьшению внутренней температуры стенки, так как при этом увеличившаяся скорость потока приводит к более интенсивному охлаждению за счёт увеличивающегося коэффициента теплоотдачи. Данный вариант позволяет получить требуемый диапазон температур на внутренней поверхности электрода.

Следует заметить, что толщина внешнего слоя в данном случае получается намного толще, чем для предыдущего случая (см. рисунок 4.23). Это означает увеличение габаритных размеров и общей массы плазмотрона, а в итоге стоимости всего устройства. В приведённой конструкции появляется

дополнительное стыковочное место между стальным и алюминиевым слоем, что приводит к уменьшению технологичности всего устройства. Данных перечисленных недостатков достаточно для отказа от данного типа конструкции электрода.

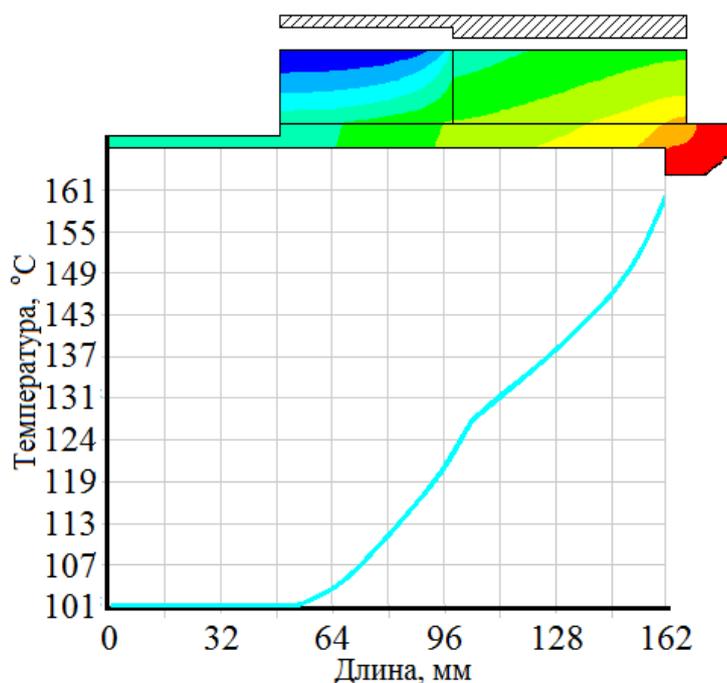


Рисунок 4.24 – Тепловое распределение в электроде – аноде с составным внешним слоем

Следующий конструктивный тип электрода – анода представлен на рисунке 4.25. В данном случае в качестве внешнего слоя применялась конусная обечайка. Преимущество данной конструкции заключается в том, что за счёт различной толщины обечайки в разных сечениях по длине достигается различный отток тепла в охлаждающую воду от стенки электрода. К сожалению, для данного случая, теплопроводность стали слишком мала, чтобы при минимальной своей толщине, обеспечить требуемый отток тепла в более термически нагруженной области. Использование других металлов, таких как латунь, бронза приводит к удорожанию устройства, что крайне не желательно. Зауживание зазора рубашки охлаждения также не обеспечивает требуемый диапазон температур на внутренней поверхности электрода.

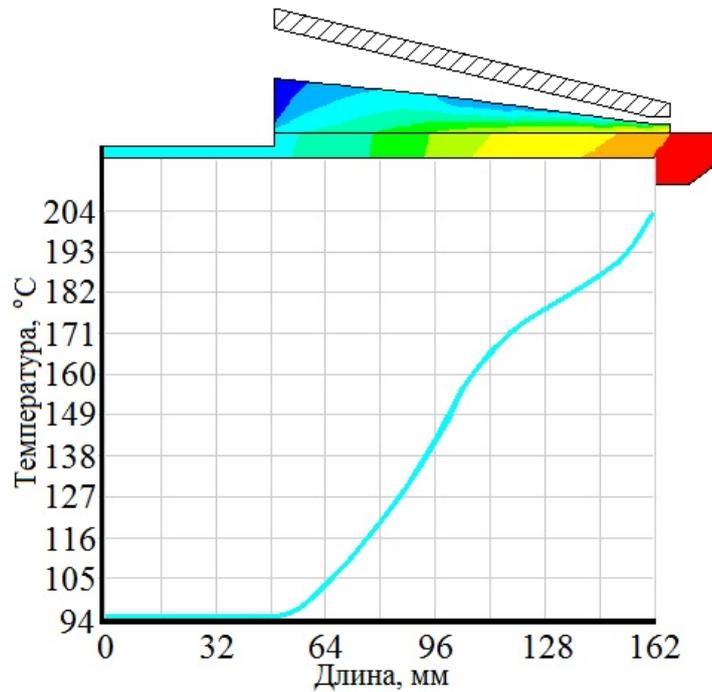


Рисунок 4.25 – Тепловое распределение в электроде – аноде с конусообразным внешним слоем

На рисунке 4.26 представлен тип составного внутреннего электрода, который учитывает все недостатки вышеописанных вариантов. На внешней поверхности второго слоя в наиболее нагруженной области (зоны *II* и *III*) нарезана прямоугольная резьба так, что верхние кромки данной резьбы соприкасаются с внешним корпусом плазматрона. 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 (зона *I*) поток воды остаётся ламинарным, и слабый отток тепла обеспечивает желаемый температурный диапазон. Данное конструктивное решение позволит фиксировать требуемую температуру на внутренней медной поверхности электрода и оптимизировать его удельную эрозию.

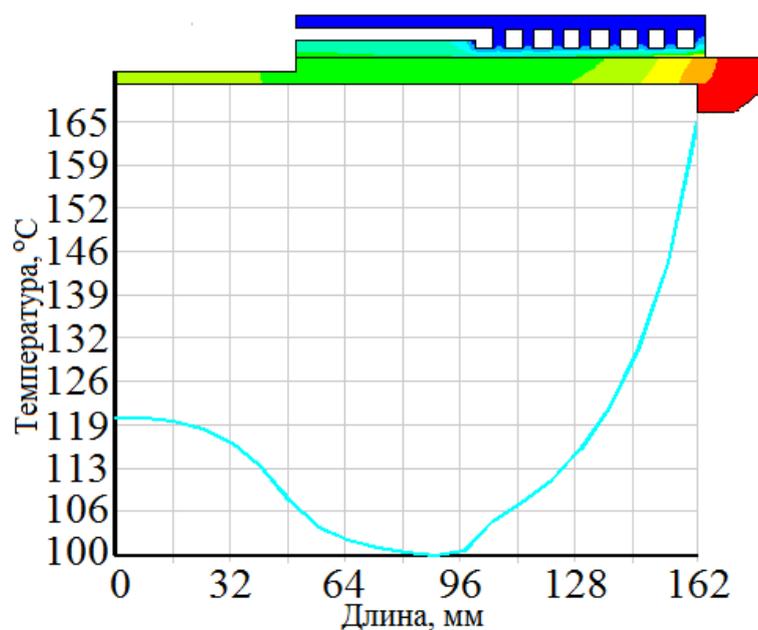


Рисунок 4.26 – Тепловое распределение в электроде – аноде с резьбовидным внешним слоем

При запуске плазмотрона с данной конструкцией электрода удельную эрозию анода удалось снизить с $(2-6) \cdot 10^{-8}$ кг/Кл до $(8,27-1,7 \cdot 10^{-9})$ кг/Кл при среднем токе дуги 200 А и расходах пара $(4-5) \cdot 10^{-3}$ кг/с. Для выходного электрода-катода \bar{G} находится также на уровне $\sim 10^{-9}$ кг/Кл.

4.6 Заключение по главе

1. Разработана принципиально новая конструктивная схема пароводяного плазмотрона без термоэмиссионного катода и дорогостоящих защитных газов для него (как например аргон или азот). Изготовлен и испытан лабораторный 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 $350 - 500$ В, расход пара $2 - 5$ г/с. Термический КПД плазмотрона с ростом массовой доли водяного пара в смеси и мощности остаётся приблизительно постоянным и составляет $\sim 65\%$. При постоянном суммарном массовом расходе пароводяного пара ~ 4 г/с плазмотрон может обеспечить

теплосодержание плазмы \sim от 10 до 20 кВт·ч/кг, что позволит организовать гибкое регулирование энергозатрат в плазмохимических процессах. Экспериментально полученное значение удельной эрозии внутреннего электрода-анода $\bar{G} = 8 \cdot 10^{-8} - 10^{-9}$ кг/Кл при силе тока дугового разряда 200-250 А указывает на необходимость дополнительных конструкторско-технологических исследований.

2. Разработаны, изготовлены и испытаны конструкции воздухонагревателя и парогенератора, необходимые для работы плазмотрона и обеспечивающие нагрев воздуха до 160-170°C и водяного пара до 250-350°C соответственно.

3. Полученные вольт-амперные, тепловые и эрозионные характеристики пароводяного плазмотрона свидетельствуют о работоспособности конструкции в целом.

4. Освоенная методика численного моделирования с помощью ПК ANSYS позволяет проводить расчёты распределения тепловых полей в различных трёхмерных элементах конструкции плазмотрона с достаточной точностью $\sim 10\%$. В результате многочисленных расчётов подобрана оптимальная конструкция составного электрода-анода, которую необходимо использовать в плазмотроне при дальнейших испытаниях и которая должна повысить ресурс и надёжность устройства в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана принципиально новая конструктивная схема пароводяного плазмотрона без термоэмиссионного катода и без применения дорогостоящих защитных газов для него (например, аргон или азот). 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 пароводяного 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 энергозатрат 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 получении 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Финкельнбург, Г. Меккер. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: НИЛ, 1961. – 370 с.;
2. Даутов Г.Ю., Жуков М.Ф. Некоторые результаты исследований свойств дуги стабилизированной водой // ППТФ, 1962, №2, с. 32-36;
3. Рудяк Э.М., Болотов А.В., Кудасов Б.М. Энергетические характеристики водяного плазмотрона / VI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. – Фрунзе, 1974. – с. 177-180;
4. Алымов Б.Д., Полуянский С.А., Галяс А.А. и др. Исследование тепловых параметров плазменных горелок, работающих на воздухе, воздушно-водяной смеси, паре / Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / Труды IV Всесоюз. конф. (г. Алма-Ата, 1-3 декабря 1970г.). – Алма-Ата: КазПТИ, 1970. – с. 551-553.
5. Болотов А.В., Кудасов Б.М., Рудяк Э.М., Касьянов В.Е. К вопросу создания генераторов водяной плазмы для разрушения горных пород / Труды IV Всесоюз. конф. (г. Алма-Ата, 1-3 декабря 1970г.). – Алма-Ата: КазПТИ, 1970. – с. 556-558;
6. Болотов А.В., Кудасов Б.М., Рудяк Э.М. и др. Исследование характеристик эл. дуги, обдуваемой водяным паром в плазмотроне двухстороннего истечения / Тез. докл. V Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Т I. – Новосибирск: ИФТ СО АН СССР, 1972.- с. 218-221;
7. Алымов Б.Д., Полуянский С.А., Лебедев В.Я. Исследование параметров вихревого плазмотрона, работающего на водяном паре / Тез. докл. V Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Т I. – Новосибирск: ИФТ СО АН СССР, 1972.- с. 222-225;
8. Алымов Б.Д., Халявченко Л.Т., Осенний В.Я. Исследование параметров теплообмена в плазмотроне с вихревой стабилизацией дуги водяным паром / VIII

Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы / Тезисы докладов Часть 3. – Новосибирск: ИФТ СО АН СССР, 1980. – с. 72-75;

9. Михайлов Б.И., Ефремов В.П. Исследование линейных электродуговых генераторов водяной плазмы / Материалы к VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, Т-1. – Алма-Ата: АЭИ, 1977. – с. 15-18;

10. Михайлов Б.И. Анализ работы паровихревых плазмотронов / VIII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы / Тезисы докл. Часть 3. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980. – с. 68 – 71;

11. Михайлов Б.И. Генерирование электродуговой пароводяной плазмы // Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы / Даутов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Урюков Б.И. и др. – Новосибирск: Наука, 2004. – с. 105 – 145;

12. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1980. 84 с.;

13. Клименко Г. К., Ляпин А. А. Конструкции электродуговых плазмотронов;

14. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.;

15. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов / Под ред. Б.Е. Патона. М.: «Наука», 1973. 243 с.;

16. Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги / Под ред. Ф.Г. Рутберга. Л.: «Наука», 1973. 152 с.;

17. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.;

18. В. Glocker, V. Borck, G. Nentwig. // 14th Inter. Symp. on Plasma Chemistry. Aug. 2-6, 1999, Prague, pp. 2037-2042;

19. Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 1 // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 4. — С. 597-612;

20. Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 4. — С. 637-657;

21. А.с. 792614 СССР, МКИ Н 05 В 7/18, Н 05 Н 1/24. Электродуговой подогреватель газа / М.Ф. Жуков, Б.И. Михайлов, В.П. Ефремов, А.С. Аньшаков. Заявлено 5.02.79 // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 48. Патент: БИ, 1997, 15, с. 262;
22. Пат. России 1503673, МКИ Н 01 С 10/02. Установка для электродугового подогрева газа / Б.И. Михайлов, Я.Б. Иохимович, А.В. Балудин // БИ. — 1995. — № 36;
23. Пат. России 1641179, МКИ Н 05 В. Способ управления перемещением пятна дуле на внутренней поверхности цилиндрического электрода электродугового плазмотрона / Б.И. Михайлов, Я.Б. Иохимович, А.В. Балудин // БИ. — 1995. — № 36;
24. А. с. 1620032 СССР, МПК Н05 В7/22. Электродуговой плазмотрон с пароводяной стабилизацией дуги / Б.И. Михайлов, Я.Б. Иохимович, А.В. Балудин, А.П. Морозов // Изобретения. — 1995. - № 32. — с. 284;
25. Пат. России 1813309, МКИ Н 05 В 7/18, Н 05 Н 1/24. Электродуговой узел для нагрева водяного пара / В.П. Лукашов, Б.И. Михайлов, Ю.Ф. Трушников и др. // БИ. — 1995. - № 9;
26. Михайлов Б.И., Поздняков Б.А., Трушников Ю.Ф., Электродуговой плазмотрон с паровихревой стабилизации дуги, Патент № 2441353 от 27.01.2012г., БИ № 3;
27. Пат. № 2268558 Пароводяной плазмотрон;
28. Пат. № 2041039 Пароводяной плазмотрон;
29. M.L. Rozenzweig, V.S. Lewellen, D.G. Ross. Confined vortex flows under interaction with boundary layer. Rocket engineering and cosmonautics, 1964, No.12, pp.94-103 (in Russian, Translation from ARS Journal);
30. L.Charakhovski, N. Kostin, “The vortex flows in electric arc heaters”, Heat Transfer. Soviet Researchs. 1984. vol. 16, No. 5, pp. 126-140;
31. N. Kostin, A. Olenovich, L. Podenok, L. Charakhovski. “On working gas swirling in vortex plasma torches”, in: Heat and mass transfer: results and perspectives, Minsk: Luikov Heat and Mass Transfer Institute, 1985, (in Russian), pp. 95-97;

32. Серба, Е.О. Создание и исследование электродугового трёхфазного пароводяного плазмотрона переменного тока: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.13 / Серба Евгений Олегович. – Санкт-Петербург, 2013. – 138 с;
33. M. R. Predtechensky, I. N. Kuropyatnik, O. M. Tukhto // 15th ISPC, pp. 1187-1190;
34. M. Predtechensky, O. Tukhto, I. Kuropyatnik, E. Chasovskikh. // Proceeding of IV Inter. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk. Sept.15-19, 2003. pp. 709-712;
35. Жовтянский В.А. Разработки Института газа в области плазменных технологий и оборудования // Энерготехнологии и ресурсосбережение, 2009. – № 4. – С. 97-108;
36. Добал В. Плазменный пиролиз углеродистых веществ в присутствии водяного пара // ХТТ. – 1978. - №3. – С. 97-101;
37. Sheer C., Korman S., Dongertly T.J. Arc gasification of coal // IV Conf. Plasma Chem. – Zurich, 1979. – P. 277-294;
38. Круковский В.К., Колобова Е.А. Газификация угля в плазме водяного пара // Теория и технология получения жидких, газообразных и синтетических топлив и сырьевая база для их получения. – М.: Изд-во ИГИ. 1981. – С. 71-78;
39. Круковский В.К., Колобова Е.А. Влияние выхода летучих веществ на процесс взаимодействия углерода топлива с водяным паром // Переработка угля в жидкие и газообразные топлива. – М.: Изд-во ИГИ. 1982. – С. 83-88;
40. Колобова Е.А. Газификация углей и шлама гидрогенизации в плазме водяного пара // ХТТ. – 1983. - №2. – С. 91-96;
41. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. – М.: Наука. 1990. -200 с;
42. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Хан Л. Плазменно-паровая газификация петрококса // Матер. 4-го Межд. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. – Иваново: Изд-во ИГХТУ. 2005. – С. 600-605;
43. Патон Б.Е., Чернец А.В., Маринский Г.С. и др. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки

медицинских и других опасных отходов. Часть I. // Современная электрометаллургия, 2005. – № 3 (80). – С. 54-63;

44. Патон Б.Е., Чернец А.В., Маринский Г.С. и др. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов. Часть II. // Современная электрометаллургия, 2005. – № 4 (81). – С. 52-60;

45. Rutberg Ph.G. Plasma Pyrolysis of Toxic Waste // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2003. – Vol. 45. – P.957-969;

46. Журнал «Твердые бытовые отходы» № 4 2011;

47. Ondrey G., Fouhy K.. Plasma arcs sputter new waste // Chemical engineering. – 1991. – December. – S. 32–35;

48. Моссэ А. Л., Горбунов А. В., Савчин В. В. Электродуговые плазменные устройства для переработки и уничтожения токсичных отходов. Матер. 4-го Межд. симп. по теоретической и прикладной плаз-мохимии // Ивановский гос. технолог. ун-т, 13–18 мая 2005 г;

49. Гонопольский А. М., Федоров О. Л. Обезвреживание отходов медицинских учреждений в герметичной плазменной печи // Чистый город. – 1999. – № 1(5) – С. 28–31;

50. Опыт внедрения системы сбора, транспортировки и плазменной переработки медицинских отходов (на примере Московской городской инфекционной клинической больницы № 1) / А. М. Гонопольский [и др.] // Чистый город. – 1999. – № 3 (7). – С. 16– 20;

51. Способ и установка для переработки радиоактивных отходов. Патент РФ, № 2320038, опубликовано 20.03.2008. Бюллетень № 8;

52. Даниленко, А.А. Теплофизические процессы плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов: Диссертация канд. техн. наук: 01.04.14 / Даниленко Андрей Анатольевич. – Новосибирск, 2011. – 204 с.;

53. Басин А.С., Жуков М.Ф., Тимошевский А.Н. и др. Плазменное уничтожение медицинских отходов // Муниципальные и промышленные отходы:

способы обезвреживания и вторичной переработки - аналитические обзоры. Новосибирск: ГПНТБ СО АН СССР, 1995, серия Экология.

54. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.;

55. Теплотехнический справочник - М., Госэнергоиздат, 1958, т.2.

56. Теплофизические свойства плавильных пылей, шлаков и зол черной металлургии. / А.Н. Афолина, Б.М. Бабошин, Е.А. Кричевцов и др. // –М.: (Экспресс–информация (ин–т «Черметинформация»)). –1982. –75 с.;

57. Теплофизические свойства промышленных материалов / К.Д. Ильченко, В.А. Чеченев, В.П. Иващенко и др. // –Днепропетровск: «Січ».–1999.– 152 с.;

58. Усачёв, А.Б. Разработка теоретических и технологических основ производства чугуна процессом жидкофазного восстановления железа ромелт: автореф. дис. доктора техн. наук: 05.16.02 / Усачёв Александр Борисович. – Москва, 2003.;

59. Ushio M. Mathematical modelling of flow field and heat transfer in high-current arc discharge / M. Ushio, J. Szekely, and C.W. Chang // Ironmaking and Steelmaking. – 1981, No. 6. – P. 279-286.

60. Szekely, J. Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric arc furnaces and dc plasma furnaces / J. Szekely, J. McKelliget and M. Choudhary // Ironmaking and Steelmaking. – 1983, Vol. 10, No.4. – P. 169-179.

61. Henning B. DC furnace containment vessel design using computational fluid dynamics / B. Henning, M. Shapiro and L.A. le Grange // Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress; INFACON X: 'Transformation through Technology' – 1 – 4 February 2004 Cape Town, South Africa. – P. 565-574.

62. Alexis J. Modeling of heat transfer from an electric arc – a simulation of heating – Part I / J. Alexis, M. Ramirez, G. Trapaga and P. Jonsson // Electric Furnace Conference Proceedings. –1999. – P. 279-287.

63. Alexis J. Modeling of a DC Electric Arc Furnace – Heat Transfer from the Arc / J. Alexis, M. Ramirez, G. Trapaga, and P. Jonsson // ISIJ International. – 2000, Vol. 40, No. 11. – P. 1089-1097.

64. Ramirez M. Effects of the Arc, Slag and Bottom bubbling of argon on the fluid flow and heat transfer of a DC EAF Bath – Part II / M. Ramirez, G. Trapaga, J. Alexis, and P. Jonsson // Electric Furnace Conference Proceedings. – 1999. – P. 751-761.

65. Ramirez M. J. Fluid flow and heat transfer in steel or steel/slag baths of a DC electric arc furnace under the influence of the arc and gas injection / M. Ramirez, G. Trapaga, and McKelliget // Paper presented at the Brimacombe Memorial Symposium. – 4 October 2000. Vancouver, British Columbia, Canada. – P. 14-18.

66. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно – энергетические технологии топливо – использования. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998;

67. Применение ЭВМ для термодинамических расчётов металлургических процессов / Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 263 с.;

68. Синярев Г.Б. Полные термодинамические функции и использование их при расчёте равновесных состояний сложных термодинамических систем // Изв. вузов. Транспортное и энергетическое машиностроение. – 1966. - № 2. – С. 99-110;

69. Синярев Г.Б., Слынько Л.Е., Трусов Б.Г. Принципы и метод определения параметров равновесного состояния // Труды МВТУ. – 1978. - № 268. – С. 4-21;

70. Рождественский И.Б., Олевинский К.К., Шевелев В.Н. Состав и термодинамические функции гетерогенной реагирующей системы // Исследования по термодинамики. – М.: Наука, 1973. – С. 49-55;

71. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Худяков, - М.: ВИНТИ АН СССР, 1971-1978. – Т. 1-4;

72. Сурис А.Л. Алгоритм термодинамического расчёта многофазных, многокомпонентных систем // II Всесоюз. симпоз. по плазмохимии. – Рига: Зинатне, 1975. – Т. 2. – С. 198;

73. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Metallurgy, 1994. – 352 с.;

74. Исламов С.Г., Суслов В.А., Иванов В.В. Расчёт пылеугольной газификации с использованием равновесной модели // Химия твёрдого топлива. – 1987. - № 4. – С. 103-106;

75. Разина Г.Н., Федосеев С.Д., Рождественский И.Б., Будко Н.А. Термодинамический анализ процесса плазменного пиролиза углей // Химия твёрдого топлива. – 1989. - № 3. – С. 137-143;

76. Георгиев И., Михайлов Б.И. Влияние температуры и состава среды на энергозатраты при плазменной газификации бурых углей различного качества // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1987. – Вып. 4, № 15. – С. 83-89;

77. Целищев П.А., Абаев Г.Г. Состав продуктов и энергетические показатели окисления твёрдого топлива // Плазменная газификация и пиролиз низкосортных углей. – М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1987. – С. 7-21;

78. Каганович Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 256 с.;

79. Жолудов Я.С., Тальнова Г.Н., Чернявский Н.Н. Высокотемпературная газификация углей Донецкого бассейна // Химия твёрдого топлива. – 1987. - № 3. – С. 130-142;

80. Ефремов Ю.М., Суслов А.А. Термодинамический анализ газификации угля // Химия твёрдого топлива. – 1987. - № 3. – С. 130-136;

81. Богачева Т.М., Петухов В.И., Целищев П.А., Абаев Г.Г. Параметры ТЭС на синтез-газе // Теплогидродинамические процессы в элементах энергооборудования электростанций. – ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1988. – С. 5-18;

82. Чмель В.Н., Дунаевская Н.И., Огий В.Н., Барбышев Б.Н. Повышение эффективности сжигания низкосортных топлив методом термохимической обработки // Изв. вузов. Энергетика. – 1985. - № 3. – С.96-100;

83. Войчак В.П., Устименко Б.П., Карпов Е.Г., Гончаров А.Г. Технико-экономические показатели процесса плазменной газификации экибастузских углей // Плазменная активация горения углей. – Алма-Ата: КазНИИЭ, 1989. – С. 134-144;

84. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов / А.С. Аньшаков, В.А. Фалеев, А.А. Даниленко и др. // Теплофизика и аэромеханика, 2007, том 14, № 4, - С. 639 – 644;

85. Electric-arc steam heater with copper tubular electrodes / А. С. Аньшаков, Э.К. Урбах, С. И. Радько, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев, Т. Ма, Ф. Хин // Contr. papers VIIth Int. Conf. “Plasma Physics and Plasma Technology” (Minsk, Belarus, Sept. 17 – 21, 2012). - Minsk: “Kovcheg”, 2012. – vol. II. - pp.727–729;

86. Energy characteristics of the arc plasmotrons at a change in geometry of a discharge chamber / А. С. Аньшаков, Э.К. Урбах, В. С. Чередниченко, С. И. Радько, А.Э. Урбах // Proceedings of the XVII Congress 21-25 may, 2012 St.Petersburg. - С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2012. - С. 138-144;

87. Plasma electric furnace for processing/utilization of carbon-bearing anthropogenic wastes / М.Г. Кузьмин, В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков, А. И. Алиферов, П. В. Домаров, 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;

88. Энергетические характеристики пароводяного плазмотрона мощностью до 100 кВт / А. С. Аньшаков, Э.К. Урбах, С. И. Радько, Э.К. Урбах, В.А. Фалеев // 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;

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

Радько, А. К. Кычкин, Э. К. Урбах, А. Э. Урбах, В. А. Фалеев // . - 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.

90. 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;

91. 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.

92. А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, С.П. Ващенко и др. Исследование сильноточной дуги в гелии // Теплофизика и аэромеханика, 2009, том 16, № 4, с. 687-689;

93. Плазмотрон струйно-плавильный (патент РФ № 2464748) / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах и др. – 2010г;

94. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. – М.: Энергия, 1975. – 380 с.;

95. Аньшаков А.С., Урбах Э.К. Исследование теплового механизма эрозии цилиндрического катода в технологических плазмотронах // Низкотемпературная плазма. 2004. Т. 20;

96. Ковалёв А.П. Парогенераторы / А.П. Ковалёв, Н.С. Лелеев, М.Д. Панасенко и др.; под ред. А.П. Ковалёва. – М.: Энергия, 1966. – 448 с.;

97. Михайлов Б.И. Исследование пульсаций в парогенерирующих трубках // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 1985. - № 10, вып. 2. - С. 43-47.;

98. Лебедев И.К. Гидродинамика паровых котлов / И.К. Лебедев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 238 с.;

99. Хабенский В.В., Балдина О.М. Анализ пульсаций расхода в системе параллельных парогенерирующих труб. // ИФЖ. – 1969. – Т. XVII, № 5. – с. 819 – 828;

100. Лелеев Н.С. Неустановившиеся движения теплоносителя в обогреваемых трубах мощных парогенераторов / Н.С. Лелеев. – М.: Энергия, 1978. – 288 с.;

101. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки: учебник для вузов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 602 с.;

102. Михайлов Б.И., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Влияние температуры цилиндрических электродов на их эрозию // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1985. - № 10, вып. 2. – С. 69-73;

103. Дутова, О.С. Термомеханические процессы в материале электрода плазмотрона: автореф. канд. техн. наук: 01.04.14 / Дутова Ольга Степановна. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2012, 20 с.;

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

105. Радько С. И. Анализ некоторых типов конструкций составного электрода пароводяного плазмотрона мощностью до 100 кВт / С. И. Радько, С. И. Творогов; науч. рук. А. С. Аньшаков // 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;

106. Radko S. I. 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;

107. Современные энергосберегающие технологии: учеб. пособие для ВУЗов/ Блинов Ю.И., Васильев А.С., Никаноров А.Н. и др. – СПб: Изд-во СПбЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.