

На правах рукописи

Фейгенсон Олег Наумович

Разработка и исследование высокочастотного плазмотрона и стенда для
переработки промышленных отходов

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002 г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Дресвин Сергей Вячеславович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Гагарин Андрей Петрович;
кандидат технических наук,
доцент Любомиров Андрей Мстиславович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
Всероссийский научно-исследовательский институт токов высокой частоты имени
В.П. Вологодина

Защита состоится "30" мая 2002 г., в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д.212.229.20 в Санкт-Петербургском государственном техническом
университете по адресу: Санкт Петербург, ул. Политехническая 29, Главное
здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан "26" апреля 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы Вторая половина XX века ознаменовалась резким обострением экологических проблем. Одной из наиболее опасных из них явилась проблема радиоактивного заражения. Уже имеющееся на планете количество радиоактивных отходов (РАО) столь велико, что даже «закрытие» атомной энергетики не избавит человечество от необходимости в течение будущих столетий вкладывать деньги и интеллектуальные усилия в решение проблемы их утилизации.

К настоящему времени разработано большое количество технологий утилизации радиоактивных отходов. В странах с развитой ядерной энергетикой широкое применение нашла технология стеклования РАО с последующим захоронением стекольных матриц. При стекловании в матрице оказываются не только радионуклиды, но и значительное количество безопасных соединений, что приводит к большому объему продуктов захоронения и является существенным недостатком технологии. В этой связи перспективными представляются современные разработки по предварительной сепарации отходов. Разрабатываются сепараторы, в которых происходит разделение РАО, переведенных в парообразное состояние, по атомному весу под воздействием специально подобранной комбинации электромагнитных полей. После такой сепарации стеклованию подвергается лишь малая часть от массы перерабатываемых отходов. В подвергаемой стеклованию части отходов, состоящей из элементов с атомным весом более 90, сосредотачивается 99,9% всех радионуклидов. Оставшаяся часть отходов не несет радиоактивной опасности. Остаются нерешенными проблемы полного испарения исходных отходов, наиболее характерное состояние для которых – жидкое. Необходимость создания высокоэффективных испарителей жидких РАО определяет актуальность данной работы.

Цели и содержание поставленных задач. Целями работы являются разработка технологического процесса испарения расплавов солей и создание экспериментальной установки – испарителя на базе высокочастотного индукционного (ВЧИ) плазмотрона. Назначение испарителя – перевод жидких РАО

в парообразное состояние с целью их дальнейшего разделения на радионуклиды и безопасные вещества по атомному весу. Работа экспериментальной установки осуществляется с расплавами солей (NaOH , $\text{NaOH}+\text{Al}(\text{OH})_3$), моделирующими радиоактивные смеси.

В процессе разработки ВЧИ испарителя и плазмотрона необходимо решить следующие задачи:

1. Спроектировать и создать экспериментальную установку, разработать процедуру ее включения и определить режимы стабильной работы.

2. Экспериментально опробовать возможность стабильной работы ВЧИ плазмотрона в парах щелочи NaOH , моделирующей радиоактивный расплав.

3. Исследовать экспериментально процессы испарения мелкодисперсных капель NaOH в ВЧИ плазме.

4. Рассчитать состав и свойства плазмы многокомпонентной смеси $90\%\text{NaOH}+10\%\text{Al}(\text{OH})_3$ (по массе), необходимые для моделирования работы ВЧИ плазмотрона в парах радиоактивных расплавов солей. Модельная смесь $90\%\text{NaOH}+10\%\text{Al}(\text{OH})_3$ наиболее близка по своим свойствам к радиоактивным отходам.

5. Определить пространственное распределение параметров плазмы (температуры, скорости, электромагнитных параметров) в разрядной камере проектируемого ВЧИ плазмотрона, используя полученные данные по составу и свойствам плазмы $\text{NaOH}+\text{Al}(\text{OH})_3$.

6. Провести расчетную оценку условий полного испарения мелких капель в плазменных потоках, на основе математического моделирования процессов движения, нагрева и испарения мелких капель в плазме.

Объект исследования – процесс испарения мелкодисперсных капель расплавов солей в ВЧИ плазме, генерируемой плазмотроном частотой 5,28 МГц в диапазоне мощностей 5 – 40 кВт

Для проведения исследования применялись методы математического моделирования и экспериментальные методы.

Методологической основой диссертации послужили научные работы: С.В.Дресвина, В.С.Клубникина, А.Л.Сурица, М.Ф.Жукова, О.П.Солоненко, И.П.Дашкевича, С.А.Панфилова, Ю.В.Цветкова, А.Л.Моссэ, Ю.Н.Туманова, С.Патанкара, М. Булоса, П.Фуше, Д.Сполдинга, Е.Пфендера.

На защиту выносятся:

1. Конструкция и технические характеристики созданной экспериментальной установки – ВЧИ плазмотрона и вакуумногостенда.
2. Результаты исследования рабочих режимов экспериментальной установки.
3. Результаты экспериментального исследования возможности и режимов работы ВЧИ плазмотрона в парах NaOH.
4. Результаты расчета состава и свойств плазмы паров смеси 90%NaOH+10%Al(OH)₃ (по массе).
5. Результаты расчета двумерного распределения параметров плазмы в разрядной камере ВЧИ плазмотрона.
6. Результаты математического моделирования процессов движения, нагревания и испарения капель NaOH в плазме.

Научная значимость результатов. Впервые получен устойчивый ВЧИ плазменный разряд в парах NaOH. Создана экспериментальная установка, позволившая исследовать возможность и режимы работы ВЧИ плазмотрона в парах NaOH и процессы испарения мелкодисперсных капель NaOH в плазме. Расчетным путем получены данные по составу и свойствам плазмы смеси 90%NaOH+10%Al(OH)₃, двумерные распределения параметров такой плазмы в разрядной камере ВЧИ плазмотрона. Проведено комплексное исследование процессов движения, нагревания и испарения мелких капель в плазменном потоке. Разработана модель инженерного расчета этих процессов.

Практическая значимость результатов. Разработан плазменный испаритель радиоактивных отходов, который может успешно применяться для перевода их в парообразное состояние с целью дальнейшего разделения по атомному весу на радионуклиды и безопасные вещества. Создана экспериментальная установка для

исследования работы ВЧИ плазмотрона и процессов испарения мелкодисперсных капель в плазме при пониженных давлениях.

Достоверность результатов обусловлена экспериментальным подтверждением возможности устойчивой работы ВЧИ плазмотрона в парах NaOH, а также корректным применением теоретических и расчетных моделей при проведении расчетов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на конференции Американского Физического Общества (APS) в рамках секции «Физика плазмы», 2001 г.; на 6-ой Европейской конференции по термическим плазменным процессам (TRP-6), 2001 г.; на политехническом симпозиуме «Молодые ученые – промышленности Северо-западного региона», 2001 г.

Публикации. По результатам теоретических и экспериментальных исследований опубликованы три статьи и тезисы трех докладов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Полный объем диссертации – 179 страниц, рисунков – 50, таблиц – 8.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены основные цели и задачи исследования, приводится общая характеристика работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе освещено современное состояние проблемы утилизации радиоактивных отходов, сделан обзор существующих методов утилизации.

Приводится краткое описание технологии сепарации паров РАО по атомному весу под воздействием электромагнитных полей. Обоснована целесообразность применения низкотемпературной плазмы для решения проблем перевода в парообразное состояние жидких РАО. Изложены основные положения предлагаемой технологии испарения расплавов солей, моделирующих РАО.

Предлагается подавать расплавы солей в плазму в виде мелких капель диаметром 10 – 70 мкм. Испарение капель исключает дистилляцию, характерную для других способов испарения многокомпонентных расплавов, содержащих в своем составе легкоплавкие и тугоплавкие соединения. Поскольку сепаратор – устройство для последующей обработки работает при давлениях порядка 0,01 Торр, то и проектируемый испаритель должен стабильно работать при пониженных давлениях.

Во второй главе приведен обзор конструкций ВЧИ плазмотронов. Отражены преимущества использования ВЧИ плазмотрона в качестве основного рабочего узла испарителя.

Решение использовать ВЧИ плазмотрон для испарения радиоактивных отходов, продиктовано следующими его достоинствами: отсутствием загрязнений плазмы продуктами эрозии электродов; возможностью работы на различных плазмообразующих газах, в том числе, агрессивных; высоким ресурсом работы; надежностью в эксплуатации.

В третьей главе содержится описание экспериментальной установки – ВЧИ плазмотрона и вакуумного стенда для исследования процессов испарения мелкодисперсных капель в плазме пониженного давления. Установка была создана в лаборатории электротехнологических установок Санкт-Петербургского государственного технического университета.

В качестве источника питания плазмотрона использован стандартный ламповый генератор ВЧГ – 5,28/60.

В главе описаны параметры основных рабочих узлов экспериментальной установки (рис. 1). Рассмотрены варианты исполнения разрядной камеры ВЧИ плазмотрона (кварцевая, металлическая водоохлаждаемая). С помощью циклограммы рабочего цикла проиллюстрирована последовательность включения и выключения установки.

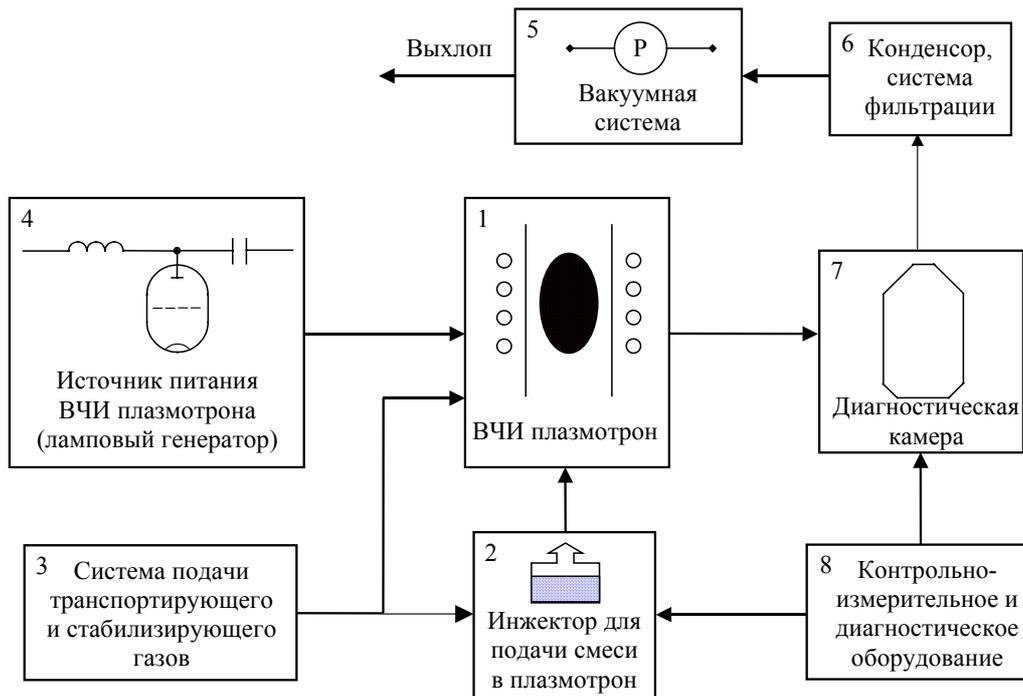


Рис. 1. Блок схема экспериментальной установки.

Глава содержит также описание предварительных экспериментов по определению области устойчивых режимов работы установки при различных давлениях в плазмотроне p , мощностях плазмы P_{pl} , расходах аргона G_{Ar} (рис. 2).

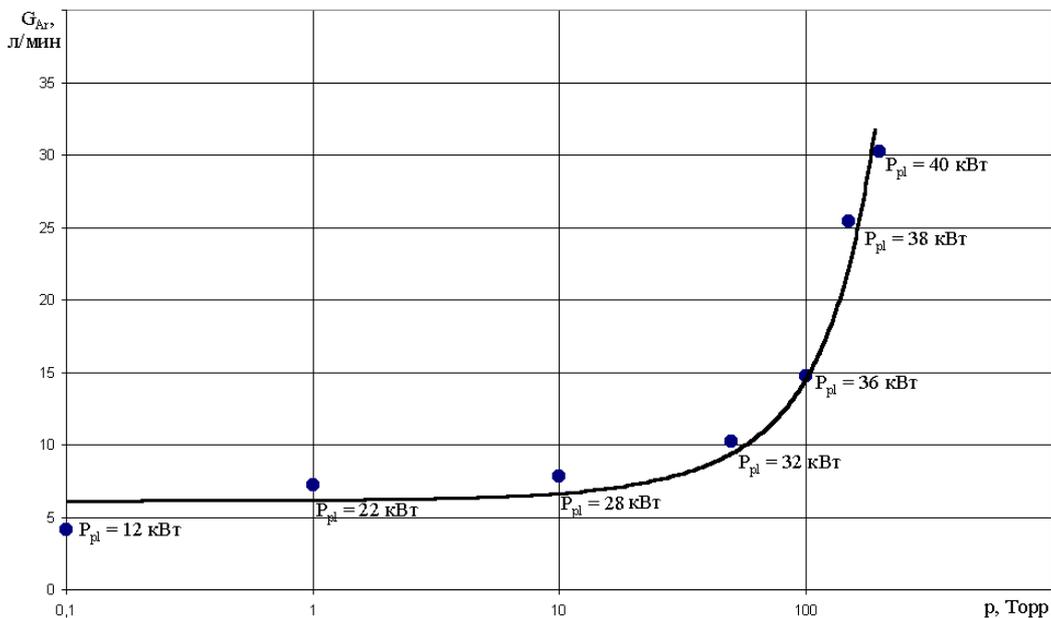
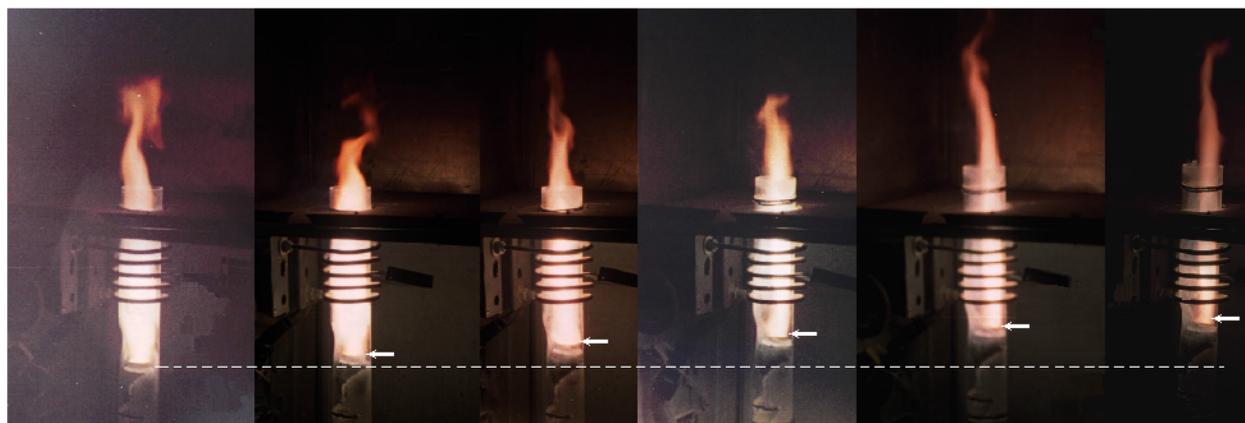


Рис. 2. Граница области устойчивых режимов работы плазмотрона.

Приводится описание работы экспериментальной установки в режиме испарения каплей NaOH диаметром 10 – 70 мкм (рабочее давление 10 Торр). Показана возможность стабильной работы ВЧИ плазмотрона и вакуумного стенда.

В главе содержится также описание методики и результатов экспериментальной работы, направленной на получение устойчивого ВЧИ плазменного разряда в парах NaOH при атмосферном давлении. Эксперименты проводились следующим образом. Генерация плазмы осуществлялась в вертикально расположенном ВЧИ плазмотроне частотой 1,76 МГц, мощностью 30 кВт. Для возможности визуального наблюдения и фоторегистрации плазмы, разрядная камера плазмотрона была изготовлена из кварцевого стекла. Поскольку мощность плазмотрона велика, было обеспечено дополнительное охлаждение кварцевых стенок камеры с внешней стороны воздушным потоком.

ВЧИ разряд зажигался в аргоне (расход $G_{Ar} = 25$ л/мин.), затем в зону индуктора снизу вверх вводился тигель, заполненный NaOH. По мере того, как тигель поднимался, и испарение NaOH происходило все активней, убавлялся расход аргона через плазмотрон, в конечном итоге подача аргона прекращалась (рис. 3). Разряд продолжал существовать, изменив при этом свой цвет из голубого в яркий желто–оранжевый.



$G_{Ar} = 25$ л/мин, $G_{Ar} = 20$ л/мин, $G_{Ar} = 15$ л/мин, $G_{Ar} = 10$ л/мин, $G_{Ar} = 5$ л/мин, $G_{Ar} = 0$ л/мин

Рис. 3. Процесс изменения плазменного разряда в зависимости от положения тигля относительно индуктора и расхода аргона.

Основные результаты главы: создана надежно работающая экспериментальная установка – ВЧИ плазмотрон и вакуумный стенд для изучения процессов испарения мелкодисперсных капель расплавов солей в плазме пониженного давления.

Отработана процедура включения и вывода установки на рабочий режим, осуществлен выбор рабочих режимов для различных давлений в плазмотроне. Экспериментально доказана возможность стабильной работы ВЧИ плазмотрона в парах NaOH.

В четвертой главе обоснован выбор методов составления и решения системы уравнений термодинамического равновесия для многокомпонентной смеси 90%NaOH+10%Al(OH)₃. Подробно рассмотрен метод составления таких систем, основанный на уравнениях закона действующих масс с использованием констант равновесия («константный» метод).

Составлена система из 38 уравнений, где в качестве неизвестных выступают парциальные давления компонентов, присутствующих в составе плазмы паров смеси 90%NaOH+10%Al(OH)₃ (по массе), наиболее точно моделирующей жидкие PAO. Предполагается, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия. Компоненты в конденсированной фазе в данном расчете не рассматриваются, поскольку область температур исследуемых плазменных процессов лежит в интервале 3500 – 7000 К. Предполагается, что все вещества, входящие в состав смеси, находятся в газовой фазе. Система была решена методом Ньютона для приращений логарифмов неизвестных. В результате, получены зависимости парциальных давлений компонентов плазмы от температуры в интервале от 2000 до 15000 К при атмосферном давлении. На рис. 4 представлены графики зависимостей парциальных давлений компонентов, присутствующих в плазме в большом количестве, от температуры.

На основе полученных зависимостей произведен расчет термодинамических и транспортных свойств плазмы паров NaOH+Al(OH)₃ с применением известных формул из молекулярно-кинетической теории газов. Под термодинамическими свойствами понимаются плотность, энтальпия и теплоемкость плазмы; под транспортными – электропроводность, теплопроводность и вязкость. Также рассчитаны степень ионизации и удельная мощность излучения плазмы NaOH+Al(OH)₃ в зависимости от температуры.

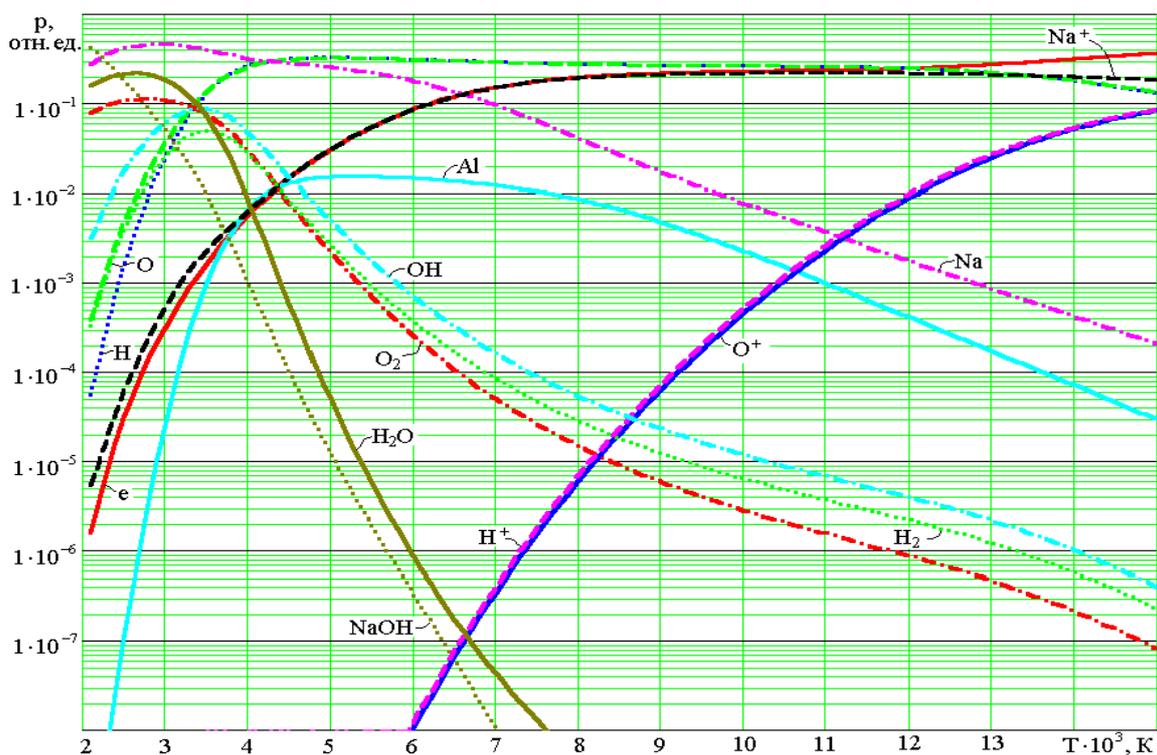


Рис.4. График зависимости парциальных давлений основных компонентов плазмы NaOH+Al(OH)₃ от температуры.

Анализ результатов показал, что большое количество натрия и водорода в составе смеси NaOH+Al(OH)₃ обусловило довольно интересное сочетание свойств такой плазмы. Она имеет высокую электропроводность благодаря присутствию в своем составе натрия, обладающего низким потенциалом ионизации (5,138 эВ). В то время, как присутствие водорода в составе смеси, обеспечивает высокую энтальпию, теплоемкость и теплопроводность плазмы, что делает перспективным применение такой плазмы для испарения мелкодисперсных капель расплавов солей.

Основной вывод главы – теоретически доказана возможность существования плазмы, в том числе и ВЧИ, в парах смеси 90%NaOH+10%Al(OH)₃. Правильность этого вывода была подтверждена экспериментально.

Полученные данные являются основой для математического моделирования плазменных процессов, связанных с применением плазмы 90%NaOH+10%Al(OH)₃.

В пятой главе представлены описание методики и результаты расчета распределения параметров плазмы в разрядной камере проектируемого ВЧИ

плазмотрона при атмосферном давлении в приближении локального термодинамического равновесия. Расчет выполнен для аргоновой плазмы и для плазмы паров 90%NaOH+10%Al(OH)₃ при атмосферном давлении.

В силу цилиндрической формы и осевой симметрии ВЧИ плазмотрона, все уравнения записываются в двумерных цилиндрических координатах. Для расчета используется система, состоящая из следующих уравнений.

Уравнение баланса энергии:

$$\rho C_p \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - U_{\text{rad}}; \quad (1)$$

Уравнения движения плазмы для двух составляющих скорости v_z и v_r :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z \cdot v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r \cdot v_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + F_z; \\ \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z \cdot v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r \cdot v_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(2r\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \\ - 2 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{r^2} + F_r; \end{array} \right. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) = 0; \quad (3)$$

Уравнение для определения векторного потенциала электромагнитного поля индуктора с плазмой:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) - \left(\frac{1}{r^2} + j\mu_0 \omega \sigma \right) A = 0; \quad (4)$$

Для решения системы уравнений (1–4) применяется метод контрольного объема.

Распределения электромагнитных параметров плазмы рассчитываются через распределение векторного потенциала в расчетной области.

Согласно полученным результатам (рис. 5), максимальная температура аргоновой плазмы выше максимальной температуры плазмы паров 90%NaOH+10%Al(OH)₃ на 4000 К. Это объясняется своеобразным сочетанием

свойств плазмы $\text{NaOH}+\text{Al}(\text{OH})_3$ – хорошей электропроводностью и высокой энтальпией. Несмотря на существенную разницу максимальных температур, представляется перспективным применение плазмы $\text{NaOH}+\text{Al}(\text{OH})_3$ для испарения мелких капель, т.к. энтальпия такой плазмы на два порядка выше, чем энтальпия плазмы аргона в интервале температур от 4000 до 6000 К.

Результаты численного моделирования плазмы паров смеси $90\%\text{NaOH}+10\%\text{Al}(\text{OH})_3$ позволяют сделать вывод о возможности устойчивого существования ВЧИ плазмы в парах РАО.

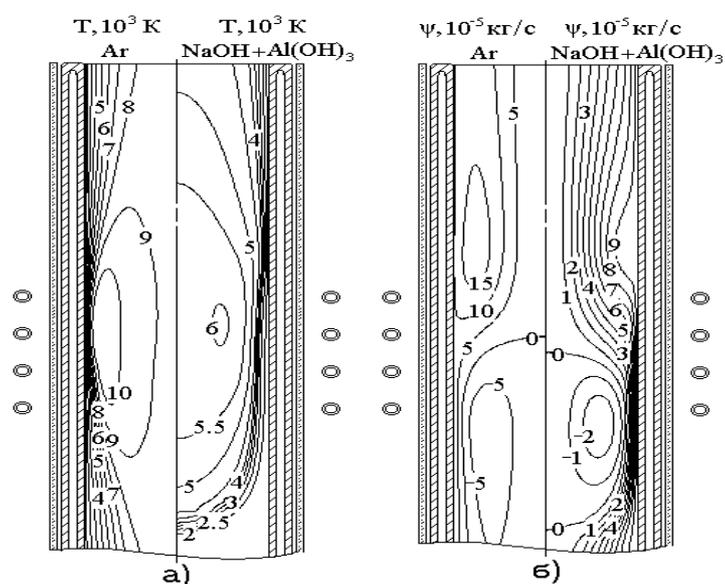


Рис.5. Распределение температуры (а) и функции потока (б) в разрядной камере ВЧИ плазмотрона.

Полученные в результате расчета поля температуры и скорости плазмы являются основой для моделирования процессов взаимодействия плазмы с мелкими каплями расплавов солей.

В шестой главе рассматриваются процессы, связанные с испарением мелкодисперсных тел в плазменных потоках. Приводится математическая модель инженерного расчета движения, нагрева и испарения мелких капель в потоках плазмы. Эта модель позволяет быстро, без сложных математических вычислений определить траекторию движения мелкой капли в потоке плазмы, изменение ее скорости и температуры, оценить время пребывания капли в плазме и выяснить, испарится ли она в результате взаимодействия с плазмой.

Расчетная область плазмы разбивается на конечное число участков, настолько малых, что скорость, температуру, а соответственно и свойства плазмы внутри них можно считать постоянными. Тогда скорость капли на каждом участке определяется по формуле:

$$v_s(t) = v_{s0} + v_p \cdot \frac{3 \cdot A \cdot \mu_p}{4 \cdot \rho_s \cdot d_s^2} \cdot \Delta t; \quad (5)$$

Температура капли определяется зависимостью:

$$T_s = T_{s0} + (q - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4) \cdot \frac{6}{\rho_s \cdot d_s \cdot c_{ps}} \cdot \Delta t; \quad (6)$$

Количество тепла, усвоенное каплей на данном расчетном участке:

$$Q_{\text{усв}} = \frac{\lambda_p}{d_s} \cdot Nu \cdot (T_p - T_s) \cdot \Delta t \cdot S_s^{\text{пов.}}; \quad (7)$$

Положение следующего участка, в который перемещается капля:

$$z = z_0 + \frac{v_{s0} + v_s}{2} \cdot \Delta t; \quad (8)$$

Для полного испарения капли необходимо сообщить ей определенное количество тепла:

$$Q_{\text{исп}} = c_p m_s \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}}) + \Delta H_{\text{кип}} \cdot m_s; \quad (9)$$

Расчет прекращается, если капля вылетела за пределы расчетной области, или выполняется условие $Q_{\text{усв}} \geq Q_{\text{исп}}$.

Произведен анализ критериальных зависимостей для числа Нуссельта – числа подобия при конвективно-кондуктивном теплообмене. В настоящее время, существует большое количество формул, полученных путем введения некоторых поправок к формуле Ранца–Маршала: $Nu = 2 + 0,6Re^{0,5}Pr^{0,33}$. С целью выбора формулы, наиболее достоверно описывающей процесс теплообмена, был проведен сопоставительный анализ одиннадцати наиболее часто используемых формул с экспериментальными данными по теплообмену водоохлаждаемых сфер и керамических частиц с плазменными потоками.

На основе результатов проведенного анализа предлагается для проведения расчетов теплообмена мелких тел с плазмой использовать формулу Ранца–Маршала.

Для корректного ее применения необходимо на программном уровне описать смену механизмов теплообмена в зависимости от соотношения скоростей плазмы и тела:

если $v_p \approx v_s$, то $Nu = 2 + 0,6Re^{0,5} Pr^{0,33}$ – преобладает кондуктивный теплообмен;

если $v_p \neq v_s$, то $Nu = 0,6Re^{0,5} Pr^{0,33}$ – преобладает конвективный теплообмен.

По предложенной модели проведены расчеты процессов движения, нагревания и испарения капель NaOH диаметром 50 мкм, для различных скоростей подачи. Их результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета движения, нагревания, испарения капли NaOH диаметром 50 мкм в ВЧИ аргоновой плазме.

Скорость подачи v_{s0} , м/с	Глубина проникновения капли в плазмотрон, Δz , мм	Полное время пребывания капли в потоке плазмы, τ , мс	Результат расчета для капли
10	46	12	не испарилась
12	51	13	не испарилась
14	57	15	не испарилась
16	65	10	испарилась
18	73	8	испарилась
20	81	7	испарилась
22	89	7	испарилась
24	96	7	испарилась
26	103	7	испарилась
28	109	6,5	испарилась
30	113	6,5	испарилась

Средний размер капель определяется техническими характеристиками ультразвукового инжектора и составляет 50 мкм. В результате расчета установлено, что для полного испарения капель заданного размера в разрабатываемом ВЧИ плазмотроне, необходимо подавать их в плазму снизу вверх по оси плазмотрона со скоростью не менее 16 м/с. Верхний предел скорости подачи капель в плазмотрон

ограничен 30 м/с. Более высокие скорости подачи требуют повышенных расходов транспортирующего газа, что в соответствии с полученными экспериментальными данными приводит к срыву разряда. Результаты расчета были учтены при конструировании экспериментальной установки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. На основе анализа литературных источников выявлено современное состояние проблемы утилизации радиоактивных отходов. Рассмотрена перспективная технология переработки жидких РАО перед остеклованием, основанная на их испарении и последующем разделении по атомному весу на радионуклиды, подвергаемые стеклованию, и безопасные вещества.

2. Доказана перспективность использования ВЧИ плазмы для испарения жидких РАО перед их дальнейшей сепарацией.

3. Разработаны и созданы – ВЧИ плазмотрон частотой 5,28 МГц, работающий в диапазоне мощностей от 5 до 40 кВт, и экспериментальная установка – вакуумный стенд для исследования процессов испарения мелкодисперсных капель расплавов солей в плазме пониженного давления.

4. Впервые получен устойчивый ВЧИ плазменный разряд в парах щелочи NaOH, моделирующей радиоактивные расплавы солей. Это является экспериментальным подтверждением возможности существования плазмы и в парах РАО. Такая возможность, в свою очередь, позволяет существенно снизить расходы плазмообразующего и стабилизирующего газов. Тем самым обеспечиваются необходимые условия работы вакуумного сепаратора при эксплуатации испарителя.

5. Осуществлена серия экспериментов по оптимизации режимов работы установки при различных давлениях. Проведен эксперимент по испарению капель NaOH диаметром 10 – 70 мкм в ВЧИ плазме пониженного давления. В результате экспериментов определены оптимальные рабочие режимы установки в диапазоне давлений 0,01 – 200 Торр, продемонстрирована работоспособность ВЧИ плазмотрона и вакуумного стенда.

6. Выполнены расчеты состава, термодинамических и транспортных свойств плазмы многокомпонентной смеси $90\%NaOH+10\%Al(OH)_3$ (по массе), наиболее достоверно моделирующей радиоактивные расплавы солей. На основании анализа полученных свойств показана перспективность использования такой плазмы для испарения мелкодисперсных капель. Полученные расчетным путем свойства являются необходимой основой для численного моделирования параметров плазмы $90\%NaOH+10\%Al(OH)_3$.

7. Проведены расчеты двумерного распределения параметров плазмы в разрядной камере проектируемого ВЧИ плазмотрона в приближении локального термодинамического равновесия. Результаты получены для двух различных плазмообразующих газов: 1) аргон; 2) пары смеси $90\%NaOH+10\%Al(OH)_3$. На основании теоретического анализа результатов сделан вывод о возможности стабильной работы ВЧИ плазмотрона в парах РАО. Полученные поля распределения температуры и скорости плазмы в разрядной камере плазмотрона были использованы в качестве исходных данных при моделировании процессов движения, нагрева и испарения мелкодисперсных капель в плазме.

8. Разработана методика расчетной оценки условий полного испарения мелких капель в плазменных потоках. На основе анализа критериальных зависимостей для числа Нуссельта и экспериментальных данных по теплообмену сферических тел в потоках плазмы, предложен способ коррекции на программном уровне формулы Ранца–Маршала в зависимости от смены механизмов теплообмена. Такая коррекция позволяет наиболее адекватно описывать процесс теплообмена мелких тел с плазменными потоками. С применением предложенной методики определены условия подачи капель NaOH в проектируемый плазмотрон. Полученные данные были использованы при конструировании экспериментальной установки – ВЧИ плазменного испарителя.

Созданная установка используется в качестве лабораторного стенда для экспериментального изучения процессов тепло- и массообмена ВЧИ плазмы пониженного давления с дисперсной фазой.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. S. Putvinski, B.P. Cluggish, T. Ohkawa, S.V. Dresvin, B.V. Kuteev, O.N. Feygenson, D.V. Ivanov, S.G. Zverev, et.al., Waste Vaporizer for Archimedes Mass Filter / Bulletin of American Physical Society, Division of Plasma Physics Meeting, Long Beach, California. 2001, V. 46, № 8, P. 192.
2. S.V. Dresvin, O.N. Feygenson, S.G. Zverev, J. Amouroux, D. Morvan, Investigation of Dusted Jet of RF Plasma Torch / Proc. of the 6th European Conference on Thermal Plasma Processes, Strasburg, 2000, p. 373-378.
3. S. Dresvin, O. Feygenson, S. Zverev, J. Amouroux, Velocity and Temperature Evolution of Plasma Jet With the Increasing of SiO₂ Particles Concentration. / Proc. of the 15th International Symposium on Plasma Chemistry, Orlean, 2001, V. VI, P. 2539-2544.
4. Зверев С.Г., Иванов Д.В., Фейгенсон О.Н., Дресвин С.В. Моделирование процессов тепло и массообмена при движении мелкодисперсных частиц в плазме./ Материалы политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-западного региона», СПб.: Издательство СПбГТУ, 2001, с. 21.
5. Зверев С.Г., Фейгенсон О.Н., Зарембо Р.Ю., Дресвин С.В. Расчет динамики движения и нагревания мелкодисперсных частиц в струе ВЧИ плазмы. / XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Издательство СПбГТУ, 2001. с. 91-93.
6. Фейгенсон О.Н., Зверев С.Г., Иванов Д.В., Дресвин С.В., Разработка плазменного испарителя радиоактивных отходов. / Материалы политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-западного региона», СПб.: Издательство СПбГТУ, 2001, с. 45.