

*На правах рукописи*



ДОМАРОВ ПАВЕЛ ВАДИМОВИЧ

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ  
В ПЛАЗМЕННОЙ ПЕЧИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

05.09.10 – Электротехнология

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Алиферов Александр Иванович

Официальные оппоненты: **Радченко Татьяна Борисовна**,  
доктор технических наук, профессор,  
Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова, профессор  
кафедры малого бизнеса в сварочном  
производстве;

**Хрусталеv Владимир Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Новосибирский государственный  
технический университет, профессор  
кафедры электронных приборов.

Ведущая организация: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
СО РАН

Защита состоится 26 декабря 2013 года в 11<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 26 ноября 2013г.

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

Нейман В.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблема полного уничтожения или частичной утилизации техногенных отходов (ТО) актуальна, прежде всего, с точки зрения отрицательного воздействия на окружающую среду. Также некоторые виды ТО можно рассматривать как богатый источник вторичных ресурсов (в том числе черных, цветных, редкоземельных и рассеянных металлов), и как "бесплатный" энергоноситель - возобновляемое углеродсодержащее энергетическое сырье для энергетики.

На сегодняшний день в различных странах вводятся в эксплуатацию заводы, на которых в ходе переработки ТО происходит многократное сокращение объема и массы утилизируемых отходов. В ходе сжигания ТО происходит выделение вторичных загрязняющих веществ. Например, при переработке твердых бытовых отходов (ТБО) зола мусоросжигательных заводов содержит токсичные вещества (диоксины, фураны, тяжелые металлы и др). Из-за токсичности золу мусоросжигательных заводов подвергают специальной переработке. Зарубежный опыт показывает, что для этой цели целесообразно применение плазменных технологий, обеспечивающих обезвреживание токсичной золы. Плазменные технологии позволяют перерабатывать техногенные отходы без промежуточного передела, получая из них экологически безопасный шлак и для ряда ТО – высококалорийный синтез-газ.

Процессы, протекающие в шахтных высокотемпературных печах, исследованы Аньшаковым А.С., Чередниченко В.С., Чередниченко Л.Е., Даниленко А.А., Сурис А.С., Любиной Ю.Л., и др. Среди зарубежных ученых наиболее известны исследования Пака Х.С. Все известные работы посвящены исследованию термохимических и тепловых термодинамических процессов в рабочем пространстве шахты печи, в которой реализуется нагрев перерабатываемой шихты за счет энергии, подводимой газом, нагретым в плазменном генераторе, и нет исследований комбинированных методов нагрева, например, плазменно-резистивного. Плазменный нагрев получается достаточно энергозатратным, и исследования и создание установок с комбинированным видом нагрева, обеспечивающим меньшие затраты электроэнергии на реализацию технологического процесса переработки ТО, является своевременным и актуальным.

**Объектом исследования** является шахтная плазменная электропечь с нижним плазменным введением энергии для переработки техногенных отходов.

**Предмет исследования:** электротехнологические и термохимические процессы в шахте электропечи.

**Целью работы** является исследование электротехнологических и термохимических процессов в рабочей камере шахтной высокотемпературной печи с комбинированным плазменно-резистивным нагревом и развитие методов

численного анализа для повышения энергоэффективности электротехнологического оборудования.

**Задачи**, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Разработка математической модели тепловых и физико-химических процессов в рабочей камере шахтной высокотемпературной электропечи при нелинейном выделении энергии в ходе химических реакций и от резистивного нагрева, а так же алгоритма ее реализации.

2. Создание программного обеспечения для реализации алгоритмов расчета тепловых и физико-химических процессов, протекающих в шихте высокотемпературной электропечи на языке программирования Delphi for Win32 и методики расчета плазменных генераторов, применяемых в электропечи.

3. Разработка модели в ПК ANSYS для электромагнитных процессов в рабочей камере шахтной высокотемпературной электропечи при выделении энергии от резистивного нагрева, а также алгоритмов ее реализации.

4. Разработка технических требований к конструкции высокотемпературной электропечи.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Показано влияние мощности, выделяемой посредством резистивного нагрева в зоне сушки отходов шахтной электропечи, на технологический режим в рабочей камере.

2. Разработаны математическая модель, алгоритм и программное обеспечение для расчета тепловых и физико-химических процессов, протекающих при переработке отходов в шахтной высокотемпературной электропечи, устанавливающие взаимосвязанное распределение температурного поля, мощности внутренних источников теплоты, получаемых от резистивного нагрева и химических реакций по высоте печи, в зависимости от величины тока, проходящего через шихту в электропечи, расхода газо-окислителя, расхода и состава перерабатываемого сырья.

3. Получены распределения мощности внутренних источников теплоты, формируемых за счет химических реакций по высоте печи в зависимости от процентного содержания углерода в шихте, от производительности печи по переработке отходов, от высоты реакционного пространства (шахты) печи.

4. Разработанные рекомендации по реализации высокотемпературной электротехнологии и оборудования для переработки техногенных отходов.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

- на основании теоретических исследований разработаны и реализованы алгоритмы расчета электротехнологических и термохимических процессов в шахте высокотемпературной электропечи; разработано программное

обеспечение для расчета температурного поля в рабочей камере шахты и энерговыделения за счет химических реакций, протекающих в шихте под действием газа-окислителя;

- разработаны технические требования к конструкции энергоэффективной высокотемпературной электротехнологической установки с комбинированным плазменно-резистивным нагревом для переработки техногенных отходов.

***На защиту выносятся:***

1. Математическая модель, алгоритмы и программное обеспечение для расчета тепловых и физико-химических процессов в рабочем пространстве плазменной шахтной электропечи с учетом внутренних тепловыделений от химических реакций и резистивного нагрева.
2. Результаты исследований температурного поля по высоте шахты печи, получаемого в процессе плазменного и комбинированного плазменно-резистивного нагрева, а также распределения мощности внутренних источников от химических реакций и резистивного нагрева.
3. Разработанные рекомендации для высокотемпературной электротехнологии и оборудования по переработке техногенных отходов, обеспечивающих улучшение энергетических показателей оборудования.

***Достоверность*** полученных результатов определяется сопоставительным анализом результатов расчетов с известными в литературе расчетно-экспериментальными данными, а также тщательным тестированием программных моделей.

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

***Личный вклад автора.*** Автору принадлежит постановка задачи данного исследования; разработка программного обеспечения для расчета температурного поля в рабочем пространстве шахты электропечи на базе численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих баланс энергии во взаимно проникающих движущихся навстречу друг другу шихте ТО и газовом потоке, нагреваемом плазменным генератором; разработка модели в программном комплексе ANSYS и исследование влияния энергии, выделяемой от резистивного нагрева, на температурное поле в шахте электропечи.

***Апробация работы:*** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII конгрессе (г. Санкт-Петербург), конференции «Цветные металлы-2012» (г. Красноярск), VIII международной

научной конференции студентов «Энергия-2013» (Иваново-2013), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск 2012), первом международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (Красноярск 2010), второй научно-практической конференции с международным участием «Инновационная энергетика 2010» (Новосибирск 2010), форуме IFOST 2008 (Новосибирск 2008), 3-й научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, Электромеханика и Электротехнологии, ЭЭЭ-2007» (Новосибирск 2007), всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск 2007), Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» (Новосибирск 2007), 2-й научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии и природопользования в Казахстане и сопредельных территориях» (Павлодар, Казахстан, 2007), XI-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Алушта, Крым, Украина, 2006).

**Публикации:** основное содержание диссертации опубликовано в 15 печатных работах, в том числе 2 в рецензируемых изданиях, вошедших в перечень рекомендованных ВАК РФ, 13 – в материалах международных и российских конференций.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация включает введение, 5 глав, заключение, список использованных источников и приложения. Работа содержит 140 страниц основного текста, включая 38 рисунков и 9 таблиц. Список использованных источников состоит из 49 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель работы, выделены научная новизна, задачи научных исследований.

**В первой главе** рассматриваются различные способы утилизации и переработки техногенных отходов, начиная от складирования отходов на полигонах до высокотемпературной газификации.

Существующие промышленные методы уничтожения, обезвреживания, утилизации и переработки техногенных образований и отходов (огневое сжигание, низко- и среднетемпературный пиролиз) не отвечают требованиям природоохранного законодательства. Анализ современных способов переработки различного вида отходов показывает, что в настоящее время происходит смещение технологических аспектов в сторону значительного увеличения температур в реакционной зоне. Одновременно наблюдается

функциональное разделение процессов на стадии, например, газификация органической части отходов с получением синтез-газа ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) и последующее сжигание его в энергетических котлах для получения тепла (электроэнергии) или использование в качестве ценного продукта в химических производствах, в т.ч. для получения моторного топлива.

Установки или заводы по переработке техногенных отходов способом пиролиза функционируют в Дании, США, ФРГ, Японии, Южной Корее (плазменная электропечь создана специалистами России) и других странах.

Основные преимущества современных методов плазменной переработки техногенных отходов:

- снижение объема отходов от первоначального в 10 раз – безотходная технология;
- эффективное обезвреживание отходов;
- использование энергетического потенциала органической части отходов.

Проведенный обзор и анализ литературных источников показал, что применение высокотемпературного пиролиза техногенных отходов является наиболее предпочтительным видом их переработки.

**Во второй главе** описаны физические процессы, происходящие в шахте электропечи, а также представлена математическая модель тепловых и термохимических процессов, протекающих в камере печи при реализации плазменного и резистивного нагрева. Перерабатываемая шихта техногенных отходов подается в верхнюю зону шахтной печи. По мере продвижения вниз по шахте техногенных отходов проходит ряд зон: зона сушки, зона подогрева, зона пиролиза, зона плавления. В зонах сушки и подогрева теплообмен между шихтой и газом происходит за счет конвекции, а в шихте процесс теплопередачи осуществляется теплопроводностью (рисунок 1).

Пиролиз – это процесс разложения органических соединений под действием высоких температур при отсутствии или недостатке кислорода. В зависимости от диапазона температур термический распад органических соединений может сопровождаться вторичными процессами соединения простых веществ, образовавшихся за счет пиролиза. Эти процессы взаимосвязаны и протекают одновременно. В плазменной шахтной электропечи реализуется высокотемпературный пиролиз, характеризующийся температурой 900-1050°C. В этой зоне происходит максимальный выход пиролизных газов.

Химические реакции могут сопровождаться выделением или поглощением энергии в форме теплоты. При этом химические превращения неразрывно связаны с процессом тепломассообмена.

В работе выполнено моделирование тепловых и термохимических процессов, протекающих шахтной плазменной электропечи. Такого типа печи чаще всего работают в режимах противотока, когда обрабатываемое сырье

перемещается за счет естественного схода вниз, а газовые потоки направляются снизу вверх (рисунок 1).

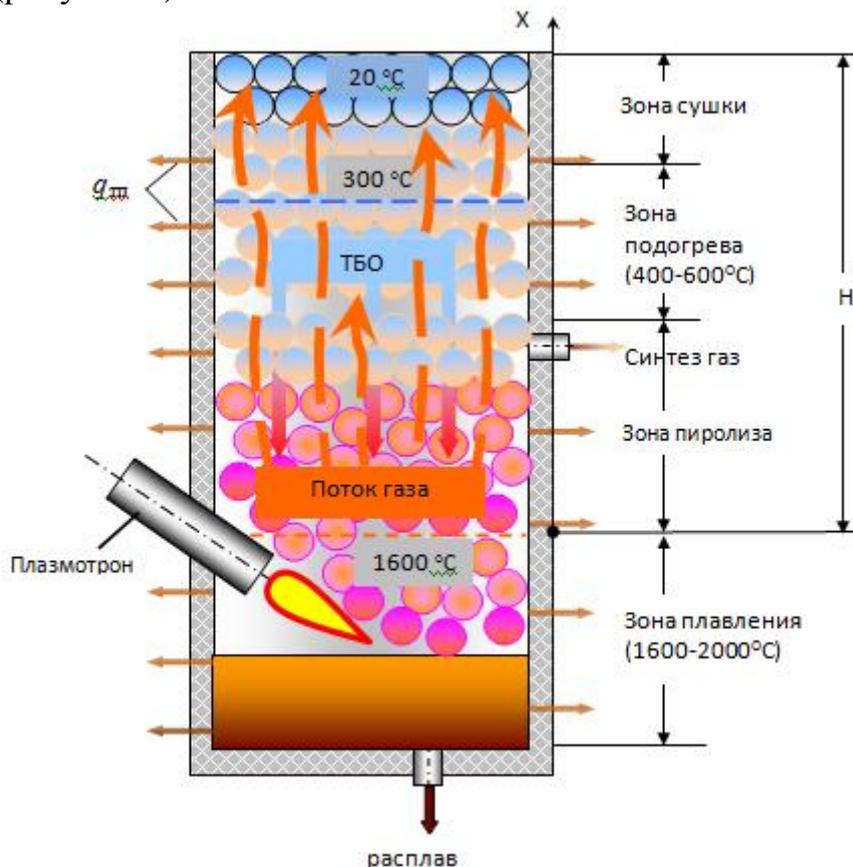


Рисунок 1 - Схема зон обработки ТБО в плазменной шахтной электропечи

При разработке математической модели были учтены следующие условия. В рабочей камере высотой  $H$  шахтной печи с нижним плазменным введением энергии проводится нагрев твердых кусковых материалов, имеющих температуру  $t_0$  и подающихся сверху с расходом  $G_M^0$ . В нижнюю часть шахты подается окислитель (воздух) с расходом  $G_G^0$  при температуре  $T_0$ . В результате тепло-массообмена между шихтой и газом формируется температурное поле в шихте и в газовой фазе.

При разработке физико-математической модели были приняты следующие основные допущения:

- 1) Не учитывается выгорание шихты и уменьшение объема ее кусков по мере продвижения вниз, т.е. размер кусков шихты остается постоянным.
- 2) Градиент температур в поперечном сечении шахты печи много меньше, чем в продольном.
- 3) Теплообмен между шихтой и газом описывается законом Ньютона –Рихмана.
- 4) Теплообмен в шихте осуществляется эффективной теплопроводностью, учитывающей собственную теплопроводность кусков шихты, контактную теплопроводность и излучение между кусками шихты. Теплообмен между газом и шихтой техногенных отходов происходит только за счет конвекции.

5) Поток газа равномерно распределен по поперечному сечению рабочей камеры печи.

В соответствии с принятыми допущениями уравнение энергетического баланса для движущейся вниз шихты и поднимающегося вверх газа для элементарного слоя  $dx$  (рисунок 2), выделенного по высоте шахты печи, принимает вид:

$$\left\{ \begin{aligned} (1-m) \cdot \frac{d}{dx} \left[ \left( \lambda_k + \frac{m \cdot d}{\frac{(1-\varepsilon) \cdot d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_l}} \right) \frac{dt}{dx} \right] - \rho \cdot U \cdot \frac{dt}{dx} - \alpha_V \cdot (t-T) + q_V - q_{mn} + q_{эл} &= 0 \\ G_T \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dx} - \alpha_V \cdot (t-T) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\alpha_V = 160 \cdot \frac{V^{0.9} \cdot T^{0.3}}{d^{0.75}} \cdot m$  - объемный коэффициент теплоотдачи;

$\alpha_l = 4 \cdot \sigma \cdot t^3$  - коэффициент лучистой теплоотдачи;  $m$  - порозность;  $\lambda$  - теплопроводность кусков техногенных отходов;  $\lambda_k$  - теплопроводность при непосредственном соприкосновении кусков шихты;  $d$  - средний размер кусков шихты;  $V$  - скорость движения газа;  $T$  - температура газа;  $t$  - температура шихты;  $\rho$  - удельная теплоемкость шихты;  $U$  - скорость движения шихты;  $c_p$  - удельная теплоемкость газа;  $\varepsilon$  - степень черноты шихты;  $G_T$  - расход газа;  $q_V$  - мощность внутренних источников от химических реакций;  $q_{mn}$  - тепловые потери через футеровку электропечи;  $q_{эл}$  - мощность внутренних источников за счет резистивного нагрева. В той части печи, где нет резистивного нагрева в уравнении (1) слагаемое  $q_{эл}$  не учитывается.

Математическая модель, описанная системой уравнений (1), была решена методом конечных разностей при нелинейном распределении теплофизических свойств шихты (теплопроводность и теплоемкость кусков ТБО, теплоемкость газа).

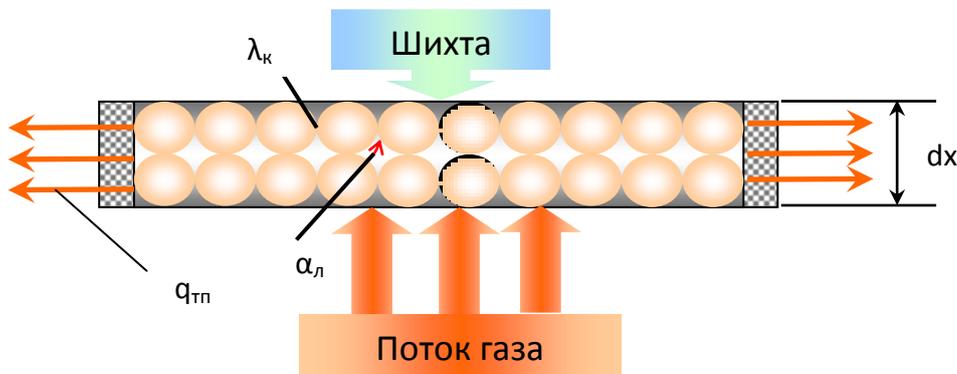
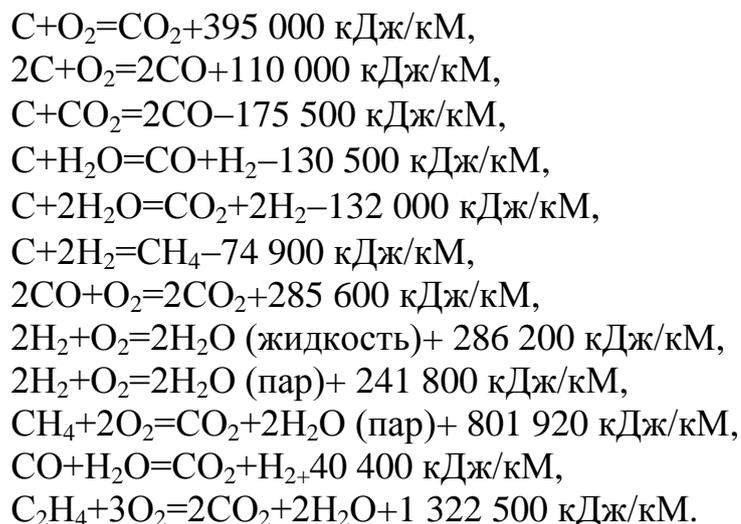


Рисунок 2 - Элементарный слой ТО в электропечи

При моделировании химических процессов полагалось, что реакционная зона находится в состоянии химического равновесия. Низкая скорость схода отходов позволяет считать, что реакции химического разложения в низкотемпературной области будут находиться в термодинамическом равновесии. Таким образом, для расчета энергетических эффектов можно использовать приближение химического равновесия.

Процесс переработки ТБО описывается следующей системой химических уравнения:



Каждая реакция идет в своем интервале температур. В установившемся режиме работы электропечи, в ее рабочем пространстве имеют место стационарные распределения по высоте температур движущихся отходов и газового потока. Это обуславливает распределение энергетических эффектов химических реакций по высоте печи.

Реакция протекает при наличии реагентов в реакционном пространстве при температуре выше равновесной. При этом в системе находятся равные мольные количества веществ, участвующих в реакции (равновесные количества).

Отношение количества продуктов реакции к количеству исходных веществ оценивается константой динамического равновесия реакции, которая изменяется с температурой. Найти константу равновесия можно из уравнения:

$$\Delta G = -2,3 \cdot R \cdot T \cdot \lg K,$$

где  $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$  – изменение энергии Гиббса в реакции, кДж/моль;  $\Delta H$  – изменение энтальпии образования реакции (разница между суммарной энтальпией образования продуктов и суммарной энтальпией образования исходных веществ реакции с учетом стехиометрических коэффициентов), кДж/моль;  $\Delta S$  – изменение энтропии образования реакции, Дж/(моль·°К);  $R = 8,3144$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·°К);  $T$  – абсолютная температура системы, °К;  $K$  – константа динамического равновесия системы.

Для заданного времени воздействия температуры на отходы получена степень их разложения в зависимости от температуры в диапазоне 0 до 2000 °С в виде полинома второй степени.

На основании разработанного алгоритма решения системы уравнений (1) и расчета химических процессов, протекающих в шахте печи, создано программное обеспечение для вычисления распределения температурного поля по высоте шахты печи в зависимости от расхода газа-окислителя, подачи шихты ГО, высоты шахты и мощности, вводимой от резистивного нагрева.

**В третьей главе** представлены результаты исследования распределения температуры шихты и газа по высоте шахты печи в зависимости от расхода газа-окислителя, производительности шахтной плазменной электропечи, высоты рабочего пространства шахты, а также распределения мощности химических реакций от расхода шихты, расхода газа, морфологического состава ГО, процентного содержания углерода. Расчеты были выполнены для установки производительностью переработки отходов 500кг/час. Диаметр камеры печи был выбран 1м, высота шахты 4м.

Для расчета химических взаимодействий шихты техногенных отходов и газа-окислителя, а также электромагнитного поля в шихте и температурного в шихте и газовой фазе из техногенных отходов были выбраны твердые бытовые отходы.

На рисунке 3 представлено распределение мощности, выделяемой по высоте шахты печи в ходе химических реакций. Эта зависимость представлена в функции высоты  $H$  шахты печи. Из графика видно, что при меньшей высоте реакционной зоны электропечи, происходит наибольшее выделение энергии.

На рисунке 4 представлена зависимость мощности, получаемой от химических реакций, от процентного содержания углерода в шихте. С увеличением процентного содержания углерода максимум данной зависимости смещается в сторону высоких температур. Эта энергия вносит существенный вклад в распределение температурного поля по высоте шахты. Увеличение %С в шихте соответствует технологической операции подшихтовки углем перерабатываемого твердых бытовых отходов. Такая дополнительная подшихтовка твердых бытовых отходов приводит к увеличению мощности, выделяемой за счет химических реакций в средней части шахты печи, при этом зона пиролиза и зона горения (плавления оставшегося неорганического вещества) смещается по координате  $x$  (рисунок 1) вверх.



Рисунок 3 - Распределение мощности химических реакций  $P_x$  по координате  $x$  (см. рисунок 1) в зависимости от высоты  $H$  реакционной зоны печи: 1 -  $H = 2\text{м}$ ; 2 -  $H = 3\text{м}$ ; 3 -  $H = 4\text{м}$ ; 4 -  $H = 5\text{м}$ .

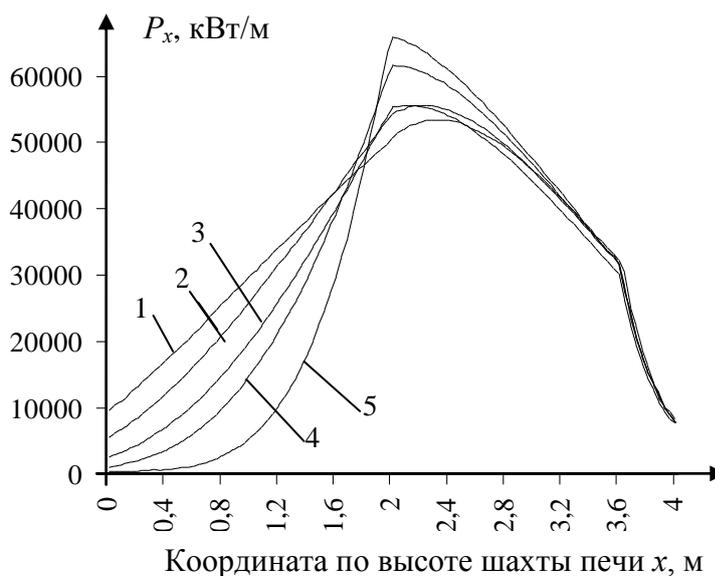


Рисунок 4 - Зависимость распределения мощности химических реакций  $P_x$  по высоте шахты печи: 1 – содержание углерода в ТБО-20%; 2 - 23%; 3 - 26%; 4 - 29%; 5 - 32%.

Это дает возможность уменьшить высоту шахты. Рисунок 5 подтверждает существенное влияние энергии химических реакций на формирование температурного поля по высоте шахты печи.

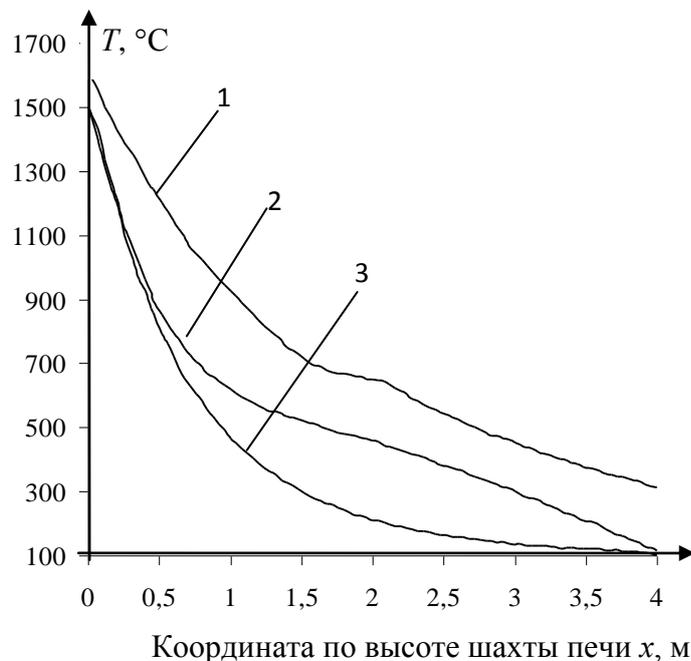


Рисунок 5 - Зависимость распределения температур по высоте шахты печи: 1 – температура газа при выделении химических реакций; 2 - температура шихты при выделении химических реакций; 3 - температура шихты без выделения химических реакций.

**В четвертой** главе представлена разработанная модель и ее реализация в программном комплексе ANSYS для электромагнитной и тепловой задачи резистивного нагрева шихты техногенных отходов в шахте печи.

Анализ физических процессов, протекающих в шахте печи, показал, что реализация резистивного нагрева в такой электропечи возможна только в зоне сушки шихты ТБО, когда она достаточно влажная и обладает необходимым электрическим сопротивлением. Традиционно шахтные печи для высокотемпературной обработки шихтовых дисперсных материалов (руд, ТБО и т.д.) выполняют цилиндрическими с небольшой конусностью. Расчеты, выполненные для цилиндрической камеры печи, показали, что независимо от рода тока (переменный, постоянный), формы электродов, однофазном или трехфазном напряжении (2 или 3 электрода по периметру шахты), распределение мощности внутренних источников в поперечном сечении шахты получается неравномерное. До 70% мощности выделяется в очень узкой области, сосредоточенной у торцов электродов, а остальная мощность выделяется в остальном пространстве этого сечения, ослабевая к центральной (осевой) зоне шахты. На основании анализа данных результатов было установлено, что в зоне сушки для реализации резистивного нагрева шихты ТБО печь должна иметь квадратное или прямоугольное поперечное сечение.

Расчеты показали, что в этом случае распределение удельной мощности в поперечном сечении шахты получается равномерным, обеспечивая равномерный по сечению шахты нагрев шихты.

Уровень мощности, вводимой в шихту посредством резистивного нагрева в зоне сушки, может достигать 20-50% от мощности плазмотронов, требуемой для реализации технологии переработки ТБО.

Результаты получены для квадратного поперечного сечения зоны сушки  $1 \times 1 \text{ м}^2$ , высотой 1 м и общей высотой камеры  $H = 4 \text{ м}$ . На рисунке 6 приведена зависимость вводимой мощности от напряжения промышленной частоты, прикладываемого к графитовым электродам, расположенным на противоположных стенках зоны сушки. При диапазоне изменения напряжения от 250 В до 1000 В мощность увеличивается от 15 кВт до 200 кВт.

Численное моделирование в программном комплексе ANSYS позволило рассчитать распределение мощности внутренних источников в шихте ТБО  $q_{\text{эл}}$  по сечению и высоте зоны сушки.

Данное распределение, введенное в программный комплекс, реализующий модель (1) теплообмена в движущихся, навстречу друг другу, шихте ТБО и газе позволили исследовать влияние резистивного нагрева шихты на тепловые процессы в рабочем пространстве печи.

На рисунке 7 представлены зависимости температурного поля в шихте и газе при мощности плазмотрона 200кВт и мощности резистивного нагрева 100кВт.

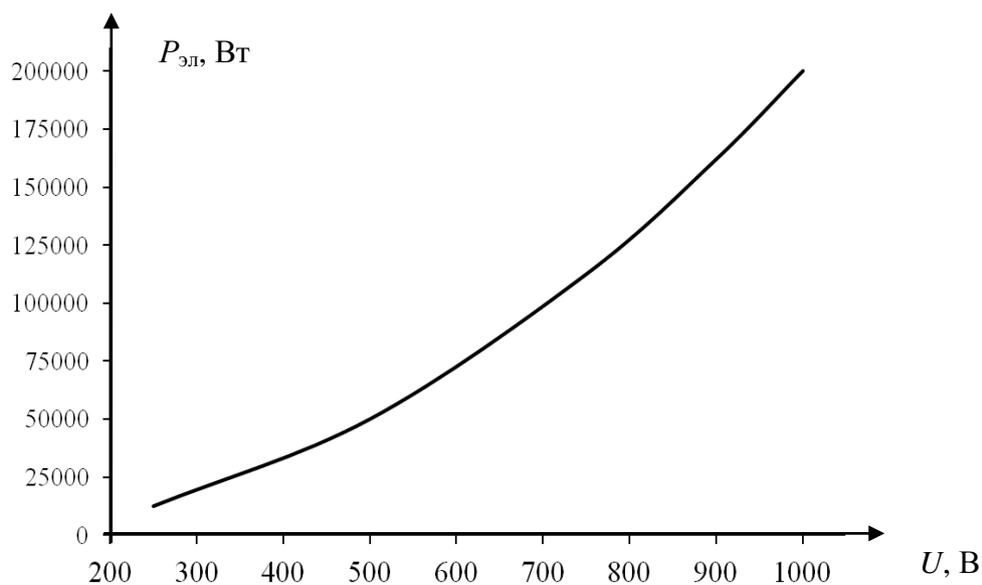


Рисунок 6 - Зависимость мощности  $P_{\text{эл}}$ , выделяемой в зоне сушки, от напряжения  $U$  на электродах при резистивном нагреве

Введение дополнительной мощности резистивным нагревом обеспечило увеличение температуры газа с  $300^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Такой комбинированный нагрев шихты позволяет увеличить температуру синтез-газа, который при повторном попадании в высокотемпературную зону печи, будет требовать, примерно, в 1,5 раза меньше энергии плазмотрона, необходимой для его подогрева до температуры  $1200^{\circ}\text{C}$ , позволяющей при быстрой закалке газа получить из него газ, не содержащей диаксина и фураны.

Кроме того, как показали расчеты при отношении мощности плазмотрона и мощности резистивного нагрева 1:1, получается распределение температуры шихты и газа по высоте печи, близкие к профилю распределения этих температур, получаемого при двойной мощности плазмотронов, нагревающих печь без резистивного нагрева.

Таким образом, при реализации комбинированного плазменно-резистивного нагрева шихты ТБО обеспечивается значительная экономия электроэнергии. При вводе энергии резистивным нагревом КПД с учетом тепловых потерь через футеровку может достигать 80%, а при работе только от плазмотрона данный КПД будет не более 50%.

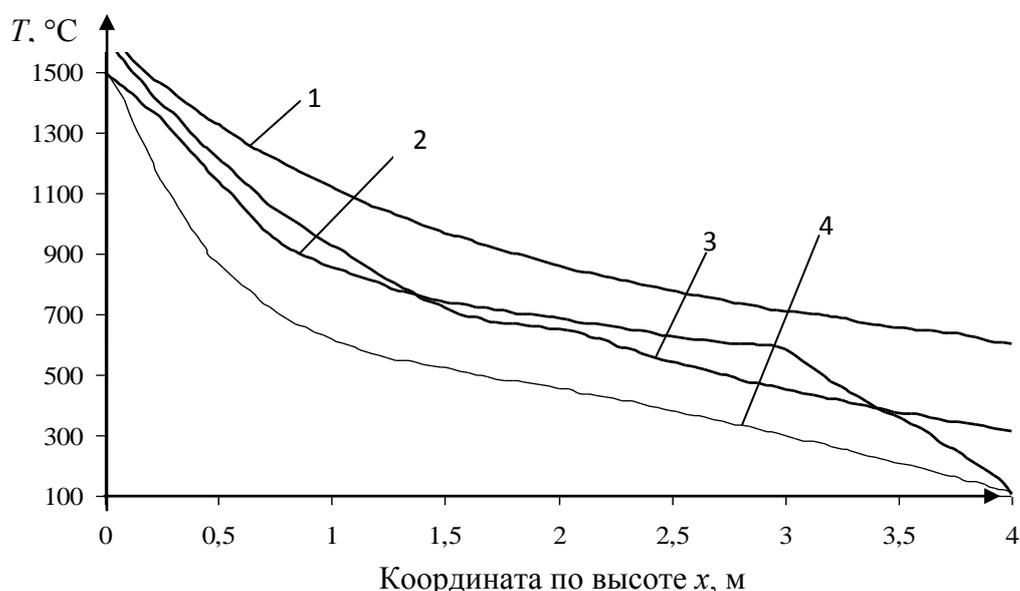


Рисунок 7 - Распределение температуры по высоте печи при наличии и отсутствии резистивного нагрева: 1 – температура газа с резистивным нагревом; 2 - температура газа без резистивного нагрева; 3 - температура шихты с резистивным нагревом; 4 - температура газа без резистивного нагрева.

**В пятой** главе обоснованы технические требования к конструкции энергоэффективной высокотемпературной электротехнологической установки для переработки техногенных отходов, включающую две камеры печи: верхняя камера представляет из себя шахту квадратного поперечного сечения, плавно переходящую в нижнюю камеру конического поперечного сечения. В верхней камере реализуется режим сушки влажных отходов за счет энергии переносимой газом, прошедшим через нижнюю камеру, и активной мощности, выделяемой во влажной шихте за счет протекающего в ней тока промышленной частоты, подводимого к ее объему через графитовые электроды. Форма верхней камеры и форма графитовых электродов обеспечивают равномерное распределение мощности внутренних источников тепла от протекающего тока во всем объеме верхней камеры.

Прошедшие через зону сушки отходы попадают в нижнюю камеру и проходят следующие стадии: зона подогрева, зона пиролиза, зона горения.

Наличие верхней камеры, в которой выделяется дополнительная мощность за счет протекания электрического тока, позволяет уменьшить мощность плазменного генератора на 20-50%, что позволяет использовать при одинаковой производительности печи по переработке отходов плазмотроны меньшей мощности с бóльшим ресурсом работы и сроком службы.

Предлагаемое техническое решение позволяет выполнять переработку отходов со значительной экономией энергии по сравнению с плазменной установкой без дополнительного резистивного нагрева.

На основании разработанных математических моделей и программного обеспечения создана методика выбора мощности, электрических характеристик и конструктивного исполнения плазмотрона, применяемого в данной установке.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана математическая модель, алгоритм расчета и программное обеспечение на базе численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих баланс энергии во взаимно проникающих и движущихся навстречу друг другу шихте техногенных отходов и газовом потоке, для тепловых, электрофизических и физико-химических процессов, протекающих при переработке отходов в шахтной высокотемпературной электропечи, устанавливающие взаимосвязанное распределение температурного поля, мощности внутренних источников теплоты, получаемых за счет резистивного нагрева в зоне сушки и химических реакций, по высоте печи при фиксированной мощности плазмотрона.

2. Созданные математические модели позволили выявить влияние процентного содержания углерода в шихте, расхода плазмообразующего газа (воздуха), производительности на распределение по высоте шахты удельной мощности, выделяемой в шихте от химических реакций, а также на распределение температуры газа и шихты.

3. Разработанные математические модели и программное обеспечение позволили сформировать технические требования к конструкции энергоэффективной высокотемпературной электротехнологической установки и электротехнологии для переработки техногенных отходов. Наличие верхней камеры квадратного поперечного сечения, в которой шихта дополнительно нагревается за счет резистивного нагрева, позволяет уменьшить мощность плазменного генератора на 20-50%. Что позволяет использовать при одинаковой производительности печи по переработке техногенных отходов плазмотроны меньшей мощности с бóльшим ресурсом работы и сроком службы.

4. Разработанное техническое решение на конструктивное исполнение верхней камеры электропечи, позволяет выполнять переработку отходов со значительной экономией энергии по сравнению с плазменной электропечью без дополнительного резистивного нагрева.

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

1. Теплообмен в рабочей камере шахтной плазменной печи при переработке техногенных отходов / А. И. Алиферов, А. С. Аньшаков, В. А. Сеницын, П. В. Домаров, Д. С. Власов // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2011. – № 10. – С. 154–159.
2. Программный комплекс для расчета индуктивных сопротивлений вторичных токоподводов электротехнологических установок / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Д.С. Власов, Л.П. Горева, П.В. Домаров // *Электротехника*. – 2010. - №5. – С. 33-37.

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

3. Плазменная технология переработки технологических отходов / П. В. Домаров, А. Г. Афиногентова // *Материалы VIII Международной научной конференции студентов «Энергия–2013»*, г. Иваново, 23-25 апреля 2013 года. - Иваново: Изд-во ИГТУ, 2013. - С.6-8
4. Plasma electric furnace for processing/utilization of carbon-bearing anthropogenic wastes / M.G. Kuzmin, V.S. Cherednichenko, A.S. Anshakov, A.I. Aliferov, P.V. Domarov, S.I. Radko, E.K. Urbakh, A.E. Urbakh, V.A. Faleev // *Proceedings of the XVII Congress 21-25 May, 2012 St.Petersburg*. - St.Petersburg: Publish house of St.Petersburg State Electro technical University "ЛЭТИ", 2012. - С. 127-131
5. Software complex to calculate inductances of secondary current contacts of electrotechnological installations / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, L.P. Goreva, D.S. Vlasov, P.V. Domarov// *Proceedings of the XVII Congress 21-25 May, 2012 St.Petersburg*. - St.Petersburg: Publish house of St.Petersburg State Electro technical University "ЛЭТИ", 2012. - С. 321-326
6. Теплообмен в рабочей камере шахтной плазменной печи при переработке техногенных отходов / А. И. Алиферов, А. С. Аньшаков, В. А. Сеницын, П. В. Домаров, Д. С. Власов // *Цветные металлы-2012: сб. науч. статей*. - Красноярск : Версо, 2012. - С. 781-783.
7. Плазменная электротехнология и оборудование для переработки углеродсодержащих техногенных отходов / А. И. Алиферов, А. С. Аньшаков, П. В. Домаров, В. С. Чередниченко // *Энергетика в глобальном мире / Сб. тез. докл. первого межд. научно-техн. конгресса (Красноярск, 16-18 июня 2010 г.)*. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – С. 120–121.
8. Heat Transfer Modeling at Utilization of Technogenic Wastes in a Plasma Electric Furnace / A.I. Aliferov, A.S. Anshakov, P.V. Domarov, V.A. Sinicin // *Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technologies - IFOST, Novosibirsk-Tomsk, June 23-29, Russia, 2008* .-

Novosibirsk: Publish house of Novosibirsk State Technical University, 2008.- PP 604-607.

9. Универсальная лаборатория автоматизации электротехнологических установок и исследования теплообменных процессов / П. В. Домаров, А. С. Хомяков // Наука. Технологии. Инновация // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Ч. 3 – С. 238-239.
10. Исследование теплообмена в рабочей камере шахтной электропечи для переработки техногенных отходов / А. И. Алиферов, В. А. Сеницын, П. В. Домаров, А.А. Даниленко, Д. С. Власов // Труды 3-й научно-технической конференции с международным участием "Электротехника, Электромеханика и Электротехнологии, ЭЭЭ-2007". Россия, Новосибирск, 25-26 октября 2007 г.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.- С.149-153.
11. Моделирование теплового режима в рабочей камере шахтной электропечи при переработке твердых бытовых отходов / Д. С. Власов, П. В. Домаров // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации", Россия, Новосибирск, 2007г.- Новосибирск: изд-во НГТУ, 2007.- Ч.3.- С.112-113.
12. Расчет температурного поля электропечи для переработки твердых бытовых отходов / П. В. Домаров, Д. С. Власов // Сборник тезисов докладов Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири", 22-23 мая 2007г., Россия, Новосибирск.- Новосибирск: изд-во НГАСУ, 2007.- Ч. 2.- С.20.
13. Расчет температуры в рабочей камере шахтной электропечи для переработки техногенных отходов / А. И. Алиферов, В. А. Сеницын, Д. С. Власов, П. В. Домаров // Материалы 2-й научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии и природопользования в Казахстане и сопредельных территориях», Казахстан, Павлодар, 2007г.- Павлодар: Изд-во ПГУ, 2007.- С.99-101.
14. Исследование теплообмена в рабочей камере электропечи для утилизации отходов / А. И. Алиферов, В. А. Сеницын, Г. Баярсайхан, Д. С. Власов, П. В. Домаров // XI-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта 18-23 сентября 2006 г.- М.: изд-во институт электротехники (МЭИ), 2006.- Ч. 2.- С. 72-73.
15. Разработка и исследование плазменной электропечи для переработки иловых осадков (био-отходов) / В.А. Чередниченко, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев, П. В. Домаров, А.А. Даниленко // XI-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта 18-23 сентября 2006 г.- М.: изд-во институт электротехники (МЭИ), 2006. - Ч. 2. - С. 70-71.