

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**
**ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

Диссертационный Совет Д.01.09.402

На правах рукописи

УДК 536.7:662.769

Балан Рената Кулукеевна

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ОГНЕВОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2010

Работа выполнена в Ысык-Кульском государственном университете имени К Тыныстанова, г. Каракол.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Энгельшт Владимир Семенович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Десятков Геннадий Александрович

доктор технических наук,
профессор Маймеков Зарлык Капарович

Ведущая организация: факультет физики и электроники
Кыргызского государственного национального
университете им. Ж.Баласагына

Защита диссертации состоится « 04 » июня 2010 г. в «16.00» часов на заседании Диссертационного Совета Д.01.09.402 при Институте физико-технических проблем и материаловедения Национальной Академии Наук Кыргызской Республики по адресу 720071, г.Бишкек, проспект Чуй, 265-а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке НАН КР.

Автореферат разослан « 03 » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Т.Э.Уурсова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа относится к проблемам теоретического исследования процессов переработки твердых бытовых отходов (ТБО) с целью их утилизации.

Актуальность темы. Проблема полного уничтожения или частичной утилизации ТБО актуальна, прежде всего, с точки зрения отрицательного воздействия на окружающую среду. Сложность непосредственной утилизации ТБО обусловлена, с одной стороны, их исключительной многокомпонентностью, с другой — повышенными санитарными требованиями к процессу их переработки.

Для решения этой проблемы проводятся многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, на основе которых разработаны различные методы и технологии (термические, химические, биологические и др.), ряд которых реализован на практике.

Научно-исследовательские работы в данном направлении проводятся в Институте физико-технических проблем и материаловедения НАН КР (Жеенбаев Ж.Ж., Татыбеков А. и др.), МГТУ им. Н.Баумана (Б.Г.Трусов и др.) Государственном научном центре РФ институте ГИНЦВЕТМЕТ (Гречко А.В., Денисов В.Ф., Калнин Е.И. и др.), Исследовательском центре им. М.В. Келдыша (Коротеев А.С., Альков Н.Г. и др.) и в других научных учреждениях.

Одним из перспективных является огневой способ переработки ТБО, он отличается высокой температурой, большой скоростью химических реакций. К числу недостатков этого способа относится выделение в атмосферу вредных веществ.

В данной работе приводятся результаты термодинамического анализа сжигания и газификации ТБО. Основную долю ТБО составляют углеводородные соединения. В работе проведен термодинамический анализ паровой и парокислородной газификации графита. Вычисляются адиабатическая температура, состав продуктов сгорания, энтальпия системы, теплоты химических реакций и другие термодинамические параметры.

Огненный шлак является перспективной средой для переработки твердых бытовых отходов. Его можно получить, например, при сжигании кремния в кислороде с экзотермическими присадками, проведен термодинамический анализ сжигания кремния.

Термодинамический анализ позволяет ответить на ряд вопросов, представляющих интерес для оптимизации сжигания и газификации ТБО, чем и определяется актуальность данной работы.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР Ысык-Кульского государственного университета им.К.Тыныстанова.

Цель работы. Термодинамическое исследование процессов огневой переработки твердых бытовых отходов, графита, как основного компонента ТБО, а также технического кремния в качестве альтернативного топлива.

Задачи исследования.

1. Разработать термодинамическую модель твердых бытовых отходов.
2. Провести термодинамический анализ сжигания и газификации ТБО.
3. Провести термодинамический анализ паровой и парокислородной газификации и сжигания графита.
4. Провести термодинамический анализ сжигания кремния.

Метод исследования. Термодинамический анализ процессов переработки ТБО, графита и кремния проводился с использованием программного комплекса ТЕРРА, разработанного в МГТУ им. Н.Баумана (Б.Г.Трусов). В основу его алгоритма положен термодинамический метод определения характеристик равновесия произвольных гетерогенных систем, основанный на принципе максимума энтропии (разработанный Г.Б.Синяревым, Н.А.Ватолиным, Л.С.Полаком). Этот метод позволяет описать состояния с помощью фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия. Данная программная система успешно апробирована при исследовании различных высоко-температурных процессов.

Научная новизна

1. Разработана термодинамическая модель ТБО. Модель основана на группировке компонентов ТБО и использовании универсальной программы термодинамических расчетов ТЕРРА.
2. Проведен термодинамический анализ сжигания типичного состава ТБО г. Бишкек. Получены равновесные концентрации при адиабатической температуре.
3. Выявлены зависимость температуры и коэффициента избытка окислителя от затрат энергии на газификацию ТБО. Получены продукты реакции газификации.
4. Проведен термодинамический анализ паровой и парокислородной газификации графита.
5. Проведен термодинамический анализ сжигания кремния в кислороде, азоте, воздухе. Определены адиабатическая температура, состав продуктов реакции и доля прореагировавшего кремния.

Практическая значимость

1. Разработанная методика термодинамического моделирования ТБО позволяет получать предварительную информацию об ожидаемых уровне температуры процесса, газовых выбросах (в т.ч. токсичных), продуктах реакции, что позволит оптимизировать процессы газификации и сжигания ТБО.
2. Практическую значимость имеет тот результат, что затраты на эндотермическую реакцию при получении горючих газов не являются безвозвратными, они переходят в теплотворную способность горючих газов. КПД процесса газификации ТБО остается достаточно высоким при $T=500\text{ K} \div 4000\text{ K}$.

3. Показано, что наиболее экономичный способ получения огненного шлака – сжигание кремния в кислороде при $\alpha=1$ с экзотермическими присадками. Одна из таких присадок - смесь диоксида кремния и оксида кальция, которые в конденсированном состоянии вступают в экзотермическую реакцию с выделением тепла

Достоверность основных положений и выводов обусловлена применением современных апробированных методов термодинамического анализа, и подтверждается внутренней логикой результатов и качественным согласием с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Положения выносимые на защиту

1. Методика термодинамического моделирования ТБО, позволяющая получать предварительную информацию об ожидаемых уровне температуры процесса, газовых выбросах (в т.ч. токсичных), продуктах реакции, что позволит оптимизировать процессы газификации и сжигания ТБО.

2. Результаты термодинамического анализа сжигания и газификации ТБО при атмосферном давлении, исследования равновесного состава и термодинамических параметров показавшие, что энергозатраты, для поддержания температуры огневой переработки на уровне $T=2000$ К, не превышают 1 кВт·ч на 1 кг ТБО в кислороде и 1,4 кВт·ч на 1 кг ТБО в воздухе. КПД процесса газификации ТБО остается достаточно высоким.

3. Результаты термодинамического анализа сжигания и газификации графита, исследования равновесного состава и термодинамических параметров показавшие, что затраты на эндотермическую реакцию при получении горючих газов не являются безвозвратными, они переходят в теплотворную способность горючих газов. КПД процесса газификации графита остается высоким.

4. Результаты термодинамического анализа сжигания кремния, исследования равновесного состава и термодинамических параметров показавшие, наиболее экономичный способ получения огненного шлака – сжигание кремния в кислороде при $\alpha=1$ с экзотермическими присадками. Одна из таких присадок - смесь диоксида кремния и оксида кальция, которые в конденсированном состоянии вступают в экзотермическую реакцию с выделением тепла.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Республиканской научной конференции посвященной Всемирному году физики и 80-летию профессора Л.В. Тузова (Бишкек, 2005), на Международном семинаре «Проблемы моделирования и развития технологии получения керамики» (Бишкек, 2005), на научных семинарах в Ысык-Кульском государственном университете им. К.Тыныстанова, в Кыргызском государственном национальном университете им. Ж.Баласагына, в Институте физико-технических проблем и материаловедения НАН КР.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах.

Личный вклад соискателя. Все основные научные результаты получены автором лично. Автором проведен анализ известных работ по данной проблеме, определены исходные данные, проведены расчеты, обработаны и проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы.

Совместно с А.Татыбековым обсуждались результаты по модели и термодинамическому анализу ТБО.

Инженер программист Н.Антонова участвовала при термодинамических расчетах.

Научный руководитель, доктор физико-математических наук, профессор В.С. Энгельшт поставил задачи исследований, определил метод реализации и принимал участие в обсуждении результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 150 страниц текста, 36 таблиц и 26 рисунков. Список цитируемой литературы включает 81 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, определены ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Проблемы утилизации твердых бытовых отходов» проводится обзор и анализ литературных данных по классификации отходов и методам их утилизации.

Твердые бытовые отходы образуются в результате бытовой деятельности людей и состоят из пищевых отходов, использованной тары и упаковки, изношенной одежды и других вышедших из употребления текстильных изделий, отслуживших свой срок бытовых приборов, мебели, электро- и радиотехнических устройств.

По данным мэрии г. Бишкек, усредненный за 1998 год состав ТБО приведен в табл. 1

Таблица 1- Состав твердых бытовых отходов г. Бишкек

ТБО	Бумага	Пищевые отходы	Дерево	Текстиль	Кости	Пластик	Металл	Стекло	Зола	Камни	Прочие*	Сумма
% вес	16,3	19,9	11,4	5,6	2,6	5,7	2	2	10,7	12,1	11,7	100

*Половина «прочих» ТБО - горючие.

Масштабы образования ТБО характеризуются величиной около 200-500 кг в расчете на одного человека в год.

Анализ процессов переработки твердых бытовых отходов позволил сделать заключение о том, что существующие технологии переработки весьма несовершенны с точки зрения энергетических, ресурсосберегающих и экологических показателей.

Захоронение на полигонах – основной метод обращения с ТБО во многих странах мира, что объясняется их конструктивной простотой и дешевизной. Однако с полигонами связано множество экологических и экономических проблем.

Альтернативные (активные) методы обезвреживания отходов (разбраковка, биологическое разложение, сжигание и газификация, применение огненного шлака и плазмы) отличаются большой скоростью обработки отходов и малой площадью занимаемых земель, но, как и полигонам, им присущи экологические и экономические недостатки.

Термодинамический анализ ТБО необходим при разработке и оптимизации способов огневой переработки ТБО, получения предварительной информации о температуре горения, газовых выбросах, продуктах реакции и т.д.

Расчет адиабатической температуры и продуктов сгорания проводится по универсальной программе ТЕРРА (Б.Г.Трусов). Программа ТЕРРА основана на принципе максимума энтропии, имеет обширную базу данных по термодинамическим свойствам веществ и позволяет получить полную информацию термодинамического анализа.

Адиабатическая температура при вычисленных компонентах равновесной системы находится на основе закона сохранения энергии

$$I_{np}(T_{ad})=I_{ucx}(T_0),$$

$$I_{ucx}(T_0)=\sum_j M_j \Delta_f H_j^0, \quad I_{np}(T_{ad})=\sum_i M_i \Delta_f H_i^0 + \sum_i M_i \int_{T_0}^{T_{ad}} C_{p_i}(T) dT.$$

Здесь $I_{ucx}(T_0)$ – сумма энтальпий образования исходных компонентов $\Delta_f H^0$ с учетом их мольной доли M , $I_{np}(T_{ad})$ – сумма энтальпий образования продуктов переработки и энтальпий их нагрева от начальной температуры $T_0=298,15 K$ до адиабатической T_{ad} , C_p – удельная теплоемкость.

Формулировка задачи термодинамического моделирования требует задать два условия равновесия изучаемой системы с окружающей средой. Для описания самой системы, как материального объекта, необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов и энтальпий образования входящих в систему веществ.

В результате получаем следующую информацию – адиабатическую температуру, продукты реакции (в т.ч. горючие газы, токсичные выбросы, минеральную часть). Находим теплосодержание системы, энергозатраты на эндотермические реакции при газификации и т.д.

Во второй главе «Термодинамический анализ сжигания и газификации твердых бытовых отходов» разработана термодинамическая модель твердых бытовых отходов. Приведены результаты термодинамического анализа сжигания и газификации ТБО.

2.1. Термодинамическая модель твердых бытовых отходов.

Развита модель термодинамического анализа огневой переработки твердых бытовых отходов. Модель основана на группировке компонентов ТБО и использовании универсальной программы термодинамических расчетов ТЕРРА.

Реальные ТБО сложны по составу, содержат десятки различных веществ. Необходимо сгруппировать компоненты ТБО и уменьшить их общее количество. Однако составленная так «проба» должна отражать

основные черты реальных ТБО. С другой стороны, в состав ТБО желательно включить вещества, не указанные в табл. 1, которые могут давать токсичные выбросы, чтобы найти пути их устранения.

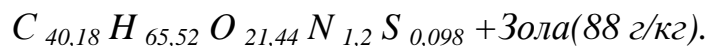
В табл. 2 приведен элементный состав горючих бытовых отходов, их теплотворная способность и влажность, найденные экспериментально в калориметрической бомбе (Ч. Мантелла)

Таблица 2 - Элементный состав сухой основы горючих отходов, % вес

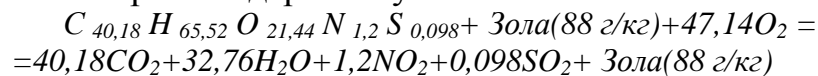
Компоненты	Углерод	Водород	Кислород	Азот	Сера	Зола	Сумма	Влажность %	Теплотв. способ. q, МДж/кг
Средние значения	48,26	6,6	34,3	1,68	0,315	8,8	100	26,6	20,6

Горючие компоненты отходов (бумага, древесина, остатки растительной и животной пищи) имеют широкие пределы изменения внешнего вида и плотности, но их химический состав весьма близок, ибо все они являются производными целлюлозы ($[C_6H_{12}O_6]_n$). В связи с этим усредняем элементный состав сухой основы, золы, влажности и теплотворной способности (табл. 2).

Отсюда с учетом атомных весов получена следующая обобщенная формула одного килограмма горючих отходов (ГО)



Формула окисления при стандартных условиях



Энтальпия образования сухих горючих отходов $\Delta_f H^0(\text{ГО})$

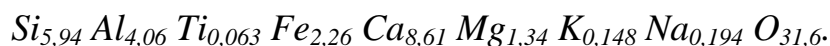
$$\Delta_f H^0(\text{ГО}) = M_{CO_2} \cdot \Delta_f H^0_{CO_2} + M_{H_2O} \cdot \Delta_f H^0_{H_2O} + M_{NO_2} \cdot \Delta_f H^0_{NO_2} + M_{SO_2} \cdot \Delta_f H^0_{SO_2} + M_{зола} \cdot \Delta_f H^0_{зола} + q = -4517 \text{ кДж/кг ГО вместе с золой}$$

В качестве золы для горючих отходов, взята зола бурого угля Кара-Киче (В.С. Энгельшт, Г.А. Десятков) (табл.3)

Таблица 3. Зола угля Кара-Киче

Компоненты	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
% вес	35,7	20,7	0,5	18,0	48,3	5,4	0,7	0,6

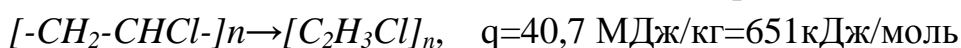
Обобщенная формула 1кг золы с учетом молекулярных весов



Энтальпия образования золы $\Delta_f H^0(\text{Зола}) = -16141 \text{ кДж/кг}$.

Зола, камни, и стекло имеют близкие химический состав и энтальпии образования. Мы объединим их весовые доли, добавим к ним металл и представим золой угля Кара-Киче под общим названием *минералы*.

Полагаем, что пластик – поливинилхлорид (ПВХ).



Энтальпия образования $\Delta_f H^0([C_2H_3Cl]_{n=1}) = -7,5 \text{ МДж/кг}$.

Количество окислителя $2,5 O_2/\text{моль ПВХ} = 1,28 \text{ кг } O_2/\text{кг ПВХ}$.

К половине «прочих» (5,85%) отнесем химикаты:
 фосфорный ангидрид P_4O_{10} $\Delta_f H^0 = -10,6$ МДж/кг, 3 %
 борная кислота H_3BO_3 $\Delta_f H^0 = -17,7$ МДж/кг, 2,85 %.

Модельный состав ТБО г. Бишкек можно представить следующим образом:

• Горючие отходы с детализировкой золы $C_{40,18}H_{65,52}O_{24,22}N_{1,2}S_{0,098}Si_{0,52}Al_{0,36}Ti_{0,006}Fe_{0,2}Ca_{0,76}Mg_{0,12}K_{0,013}Na_{0,006}$ $\Delta_f H^0 = -4,5$ МДж/кг	61,65 %
• Минералы $Si_{5,94}Al_{4,06}Ti_{0,063}Fe_{2,26}Ca_{8,61}Mg_{1,34}K_{0,148}Na_{0,194}O_{31,6}$ $\Delta_f H^0 = -16,1$ МДж/кг	26,8%
• Пластик – ПВХ C_2H_3Cl $\Delta_f H^0 = -7,5$ МДж/кг	5,7%
• Химикаты Фосфорный ангидрид P_4O_{10} $\Delta_f H^0 = -10,6$ МДж/кг Борная кислота H_3BO_3 $\Delta_f H^0 = -17,7$ МДж/кг	3 % 2,85 %
• Вода H_2O (влажность 25%) $\Delta_f H^0 = -15,9$ МДж/кг	0,333кг

Задана типичная влажность 25%, т.е. 0,333 кг H_2O на 1 кг сухих ТБО.

Окислитель - $O_2 = 0,6165 * 1,5 + 0,057 * 1,28 = 1$ кг O_2 на 1 кг сухих ТБО.

Окислитель – воздух = 4,26 кг на 1 кг сухих ТБО.

Теплотворная способность ТБО с влажностью 25% $q = 11,28$ МДж/кг.

В программе ТЕРРА задаются исходный состав ТБО, суммарная энтальпия I и давление $P = 0,1$ МПа. В результате вычисляются - адиабатическая температура, состав продуктов горения. Температура горения ТБО ($T_{ад} = 1760$ К в воздухе, $T_{ад} = 2535$ К в кислороде) обусловлена большой теплотворной способностью данного состава ТБО.

2.2. Энтальпийный фактор огневой переработки твердых бытовых отходов. На основе термодинамического анализа модельного состава твердых бытовых отходов с различной минеральной долей определены адиабатическая температура и необходимые дополнительные энергозатраты для поддержания температуры на уровне $T = 2000$ К.

Для варьирования теплотворной способности ТБО изменяется доля минеральной части, сохраняются прежними другие компоненты ТБО, влажность - 25%. В программе ТЕРРА задаются исходные данные. Определены адиабатическая температура $T_{ад}$, энтальпия системы $I_{ад}$, состав продуктов горения.

Были проведены расчеты равновесного состава компонентов при $T = 2000$ К и $P = 0,1$ МПа и определены соответствующие энтальпии I_{2000} . Энтальпийный фактор огневой переработки ТБО – дополнительный

подогрев (теплоотвод) для поддержания температуры топливной смеси на уровне $T=2000\text{ К}$ ($\Delta I = I_{2000} - I_{ад}$).

В табл.4 приведены адиабатическая температура и энтальпийный фактор при вариации теплотворной способности (q) ТБО.

Таблица 4. Адиабатическая температура и энтальпийный фактор

q , МДж/кг	12	10	8	6	4	3
Кислород						
$T_{ад}$, К	2574	2430	2175	1590	631	150
$I_{ад}$, МДж/кг	-5,50	-6,55	-7,78	-9,27	-11,06	-12,09
I_{2000} , МДж/кг	-7,65	-7,92	-8,19	-8,50	-8,88	-9,09
ΔI , МДж/кг	-2,15	-1,37	-0,41	0,77	2,18	3,00
ΔI , кВт·ч/кг ТБО	-1,07	-0,63	-0,18	0,30	0,77	1,00
Воздух						
$T_{ад}$, К	1819	1680	1426	1105	515	17
$I_{ад}$, МДж/кг	-2,25	-2,85	-3,65	-4,80	-6,56	-7,82
I_{2000} , МДж/кг	-1,95	-2,33	-2,76	-3,42	-4,45	-5,16
ΔI , МДж/кг	0,30	0,52	0,89	1,38	2,11	2,66
ΔI , кВт·ч/кг ТБО	0,36	0,56	0,80	1,04	1,25	1,37

Из табл.4 следует, что адиабатическая температура возрастает в воздухе от $T_{ад}=1000\text{ К}$ ($q=6\text{ МДж/кг}$) до $T_{ад}=1800\text{ К}$ ($q=12\text{ МДж/кг}$), и от $T_{ад}=1000\text{ К}$ ($q=5\text{ МДж/кг}$) до $T_{ад}=2500\text{ К}$ ($q=12\text{ МДж/кг}$) в кислороде. Для ускорения процесса переработки и гарантии отсутствия некоторых токсичных выбросов, таких как диоксины, принято поддерживать $T_{ад}=2000\text{ К}$.

Энергозатраты для поддержания температуры огневой переработки ТБО на уровне $T=2000\text{ К}$ не превышают 1 кВт·ч на 1 кг ТБО в кислороде и 1,4 кВт·ч на 1 кг ТБО в воздухе.

Методика компоновки модельного состава ТБО с вариацией теплотворной способности путем изменения минеральной доли отходов, может быть использована при решении подобных задач с вариацией влажности, горючих и других компонентов отходов.

2.3. Влияние температуры на газификацию твердых бытовых отходов. Проведен термодинамический анализ газификации твердых бытовых отходов при атмосферном давлении в диапазоне температур от 300 К до 4000 К. Определены температурная зависимость компонентов разложения ТБО, внешние затраты энергии на газификацию, которые идут на компенсацию эндотермического эффекта реакции, увеличение физической теплоты газов и минералов, испарение воды. Найден термический коэффициент полезного действия как отношение полной тепловой энергии при сжигании горючих газов и их физического тепла к затраченной энергии – теплотворной способности ТБО и внешних затрат.

Газификация (или пиролиз) твердых бытовых отходов позволяет органическую массу ТБО перевести в высококалорийный горючий газ. Пиролиз требует затрат энергии, которая может быть введена в систему за счет внешнего подвода тепла.

Здесь исследуется паровая газификация типичного состава ТБО, с теплотворной способностью ТБО $q=12\text{ МДж/кг}$, с влажностью 25%, содержащий углеродные и минеральные компоненты с избытком воды. Развита методика определения компонентов баланса энергии газификации, в том числе нахождения коэффициента полезного действия газификации (КПД).

В программе ТЕРРА задаются исходный состав ТБО, давление $P=0,1$ МПа и температура $T=300\div 4000$ К. В результате термодинамических расчетов получаем энтальпию системы I , теплосодержание (физическое тепло) ΔH , основные компоненты газификации ТБО.

На рис.1 приведены *газовые компоненты* газификации ТБО при $T=300\div 4000$ К.

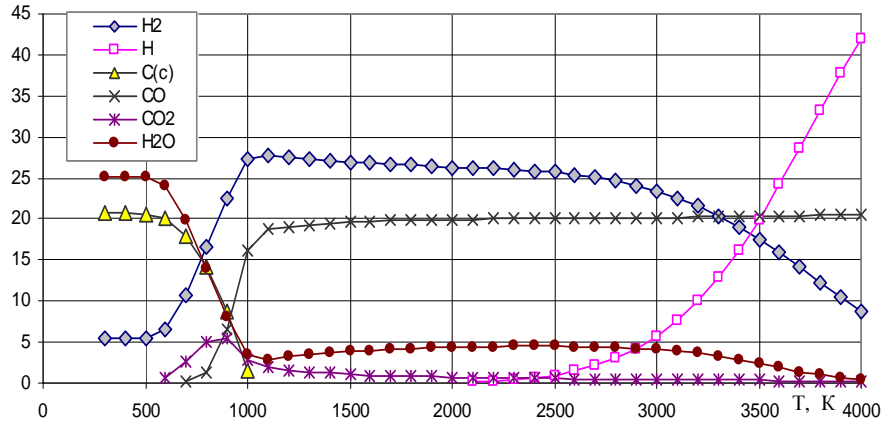
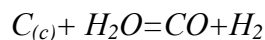


Рис.1. Температурная зависимость концентраций газовых компонентов и конденсированного углерода, [моль/кг]

В результате пиролиза ТБО имеем основные продукты реакции - горючий газ (CO , H_2). Горючий газ получен в результате эндотермической реакции разложения воды углеродом:



При $T=1100\div 4000$ К концентрация горючего газа постоянна и максимальна.

Массовая доля конденсированного состояния ($CaSiO_{3(c)}$, $MgAl_2O_{4(c)}$, $Ca_3Si_2O_7(c)$) – огненного шлака составляет 15-20 % от ТБО.

В результате анализа компонентов баланса энергии сделаны следующие выводы. Теплосодержание (физическое тепло) системы ΔH увеличивается за счет внешнего тепла. Теплотворная способность горючих газов $Q_{гг}$ примерно постоянна при $T=1000\div 2500$ К, при $T=300\div 1000$ К она возрастает за счет перехода конденсированного углерода $C_{(c)}$ в более энергоемкие оксид углерода CO и водород H_2 . Внешние затраты на газификацию ΔI ($\Delta I = I_{(T)} - I_0$, I_0 – энтальпия исходной смеси) синхронно изменяются с величиной $(Q_{гг} + \Delta H)$, что и обуславливает практически постоянный КПД процесса наработки горючего газа.

КПД процесса паровой газификации определяется как отношение полной тепловой энергии при сжигании горючих газов и их физического тепла затраченной энергии – теплотворной способности ТБО ($Q_{ТБО}$) и внешних затрат

$$\eta = \frac{|Q_{гг}| + \Delta H}{|Q_{ТБО}| + \Delta I}$$

КПД процесса газификации остается достаточно высоким $\eta=74,6\div 86,4\%$ при $T=300\div 4000$ К. Отличие КПД от 100% обусловлено

затратами на испарение воды (около 10%) и побочными эндотермическими реакциями.

2.4. Термодинамический анализ газификации и сжигания твердых бытовых отходов в атмосфере кислорода. Проведен термодинамический анализ газификации и сжигания твердых бытовых отходов при вариации коэффициента избытка окислителя α . Исследовано влияние концентрации окислителя на адиабатическую температуру при частичном сжигании ТБО. Определены компоненты горючих газов ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}$), продуктов горения ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), конденсированных компонентов (огненного шлака). Найдены составляющие баланса энергии – теплотворная способность горючих газов, физическое тепло компонентов горючих газов, продуктов горения и шлака.

Показано, что КПД сжигания ТБО при стехиометрическом количестве кислорода, $\alpha=1$, равен $\eta=56\%$, КПД газификации отходов составляет примерно 70%.

В программе ТЕРРА задаются исходный состав ТБО, энтальпия системы $I_{\text{исх}} = -7069,3 \text{ кДж/кг}$, давление $P=0,1 \text{ МПа}$.

На рис. 2 показана зависимость основных газовых компонентов от коэффициента избытка кислорода.

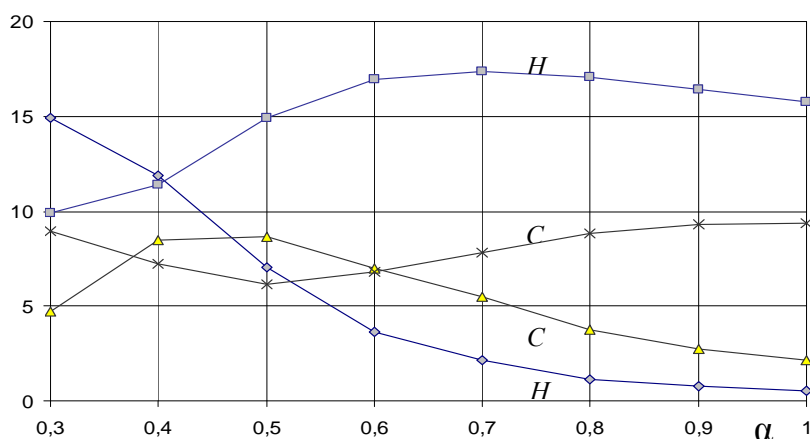


Рис.2. Основные компоненты газовых состояний в зависимости от коэффициента избытка кислорода, [моль/кг]

В целом, при $\alpha=0,3 \div 0,6$, преимущественно происходит разложение воды с образованием CO и H_2 , а при дальнейшем увеличении α - сжигание H_2 и CO с образованием воды H_2O и диоксида углерода CO_2 .

Концентрация конденсированной части компонентов ($\text{CaSiO}_{3(c)}$, $\text{MgAl}_2\text{O}_{4(c)}$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7(c)$) – огненного шлака – практически не зависит от α и его массовая доля составляет 15-20 % от ТБО.

В результате анализа компонентов баланса энергии сделаны следующие выводы. Адиабатическая температура изменяется от $T_{ad} = 860 \text{ K}$ до $T_{ad} = 2580 \text{ K}$ при возрастании $\alpha=0,3$ до $\alpha=1$. Теплосодержание смеси ΔH повышается увеличением α и насыщается при стремлении α к 1. Теплотворная способность горючих газов Q_{22} уменьшается с увеличением α . КПД потенциальной теплоты горючих газов Q_{22} включая физическое

тепло $\Delta H - \eta_{Q_{zz}+\Delta H} = \frac{|Q_{zz}| + \Delta H}{|Q_{ТБО}|}$ практически не зависит от величины α и равна $\eta \approx 70\%$. Отличие от 100% обусловлено затратами энергии на эндотермические реакции (разложение минеральной части ТБО, испарение воды, недожог и др.). Детальный анализ энергетических затрат затруднен из-за протекания большого количества сложных перекрывающихся экзо- и эндотермических реакций.

В третьей главе «Термодинамический анализ газификации и сжигания графита» приведены результаты термодинамического анализа паровой и парокислородной газификации графита.

3.1. Баланс энергии при паровой газификации графита. Проведен термодинамический анализ паровой газификации графита при атмосферном давлении в диапазоне температур от 500 К до 4000 К. Определены внешние затраты энергии на газификацию, которые идут на компенсацию эндотермического эффекта реакции, увеличение физической теплоты горючих газов, испарение воды. Затраты на эндотермическую реакцию при наработке горючих газов не являются безвозвратными, они переходят в теплотворную способность горючих газов. Найден термический коэффициент полезного действия как отношение полной тепловой энергии при сжигании горючих газов и их физического тепла к затраченной энергии – теплотворной способности графита и внешних затрат. Термический КПД в исследованном диапазоне температур составляет величину 90-96%, причем его отличие от 100% связано лишь с потерей тепла на испарение воды

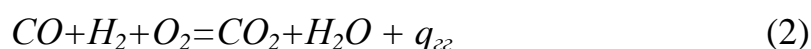
Паровая газификация углеродсодержащих материалов широко используется в производстве технологического синтез-газа – сырья для химической промышленности, горючего газа для непосредственного сжигания и получения тепловой энергии. Паровая газификация требует затрат энергии, которая может быть введена в систему за счет внешнего сжигания дополнительного топлива.

Несмотря на многочисленные исследования процесса паровой газификации, вопрос о КПД термической газификации и его зависимости от температуры, каналы распределения внешней энергии, недостаточно раскрыт. В частности, бытует мнение, что затраты энергии на эндотермическую реакцию являются невозвратными. С этим можно согласиться, когда речь идет о синтез-газе, из которого производятся какие – либо химические продукты. При выработке горючего газа, для дальнейшего сжигания и получения тепловой энергии, затраты на эндотермическую реакцию не являются безвозвратными. Эти затраты компенсируются возрастанием теплотворной способности горючего газа по сравнению с теплотворной способностью графита.

Действительно, при стандартных условиях можно записать:
Паровая газификация графита:



Сжигание горючих газов:



Брутто-реакция – сумма (1) и (2):



С другой стороны, при непосредственном сжигании графита:



Из сравнения (3) и (4), имеем:

$$q_{zz} - q_{xp} = q_c, \quad q_{zz} = q_c + q_{xp} \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), теплотворная способность горячего газа q_{zz} возрастает по сравнению с теплотворной способностью графита q_c на величину эндотермического эффекта реакции газификации q_{xp} .

Кроме того, КПД наработки горячего газа:

$$\eta = \frac{\text{энергия полученная}}{\text{энергия затраченная}} = \frac{q_{zz}}{q_c + q_{xp}} = \frac{q_c + q_{xp}}{q_c + q_{xp}} = 100\% \quad (6)$$

Т.о. в этом идеализированном случае, когда нет затрат на испарение воды и нагрев газа, КПД равен 100%.

В программе ТЕРРА задаются исходные данные - температура $T=500 \div 4000$ К, давление $P=0,1$ МПа и исходный состав $C_{(c)} + H_2O_{(c)}$. Определены энтальпия системы $I_{(T)}$ при заданной температуре, состав продуктов горения.

На рис.3 приведены основные компоненты реакции паровой газификации графита при $T=500 \div 4000$ К.

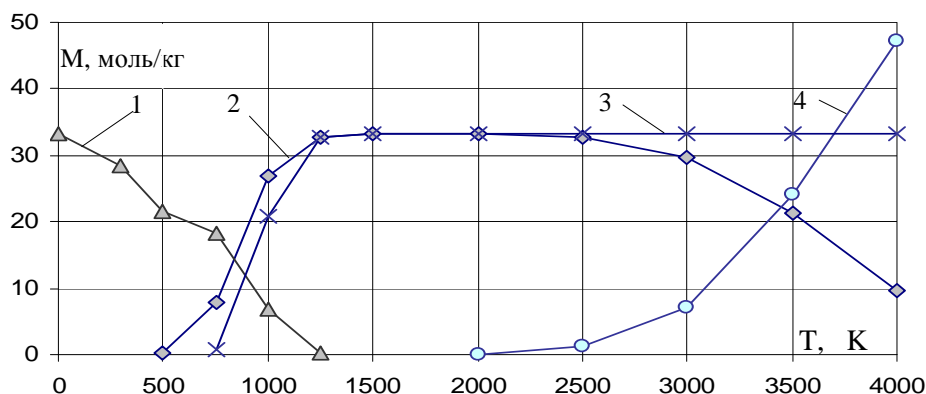


Рис. 3. Основные компоненты паровой газификации графита. 1-графит $C_{(c)}$, 2-молекулярный водород H_2 , 3- оксид углерода CO , 4-атомарный водород H

Паровая газификация графита завершается при $T=1250$ К. При $T=1250 \div 2500$ К сумма $(CO+H_2)$ постоянна и максимальна, при $T>2500$ К молекулярный водород частично диссоциирует, образуется атомарный водород.

В результате анализа компонентов баланса энергии сделаны следующие выводы. Теплосодержание системы - ΔH , увеличивается с ростом температуры. Энтальпия системы повышается на величину $\Delta I = I_{(T)} - I_0$, (где $I_{(T)}$ - энтальпия продуктов переработки, I_0 - энтальпия исходной смеси $I_0 = M_{H_2O} * \Delta_f h^0 [H_2O, c, 298.15] = -9531$ кДж/кг).

Определение теплового эффекта реакции паровой газификации графита рассмотрим на примере при $T=2000$ К. В соответствии с компонентным составом паровой газификации имеем ($T=2000$ К):

Компоненты	$C_{(c)исх}$	$H_2O_{исх}$	H_2	CO	H_2O	CO_2	H	CH_4	C_2H_2
моль/кг	33,3	33,3	33,254	33,295	0,00711	0,00154	0,07665	0,002	0,00207

Отсюда тепловой эффект реакции паровой газификации графита

$$Q_{xp} = 33,254 \cdot \Delta_f h^0(H_2) + 0,00711 \Delta_f h^0(H_2O) + 0,07665 \Delta_f h^0(H) + 33,295 \Delta_f h^0(CO) + 0,00154 \Delta_f h^0(CO_2) + 0,00207 \Delta_f h^0(C_2H_2) + 0,002 \Delta_f h^0(CH_4) - 33,3 \Delta_f h^0(C_{(c)}) - 33,3 \Delta_f h^0(H_2O_{(c)}) \approx 4388 \text{ кДж/кг},$$

$$\text{Таким образом} \quad \Delta I = Q_{xp} + \Delta H + \Delta H_{исп} \quad (8)$$

КПД процесса паровой газификации

$$\eta = \frac{|Q_c| + \Delta H}{|Q_c| + \Delta I}, \quad (9)$$

В числителе приведена полная полученная энергия, в знаменателе - затраченная

С учетом выше сказанного, КПД можно представить в виде

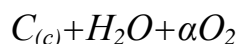
$$\eta = \frac{|Q_c| + Q_{xp} + \Delta H}{|Q_c| + \Delta H + Q_{xp} + \Delta H_{исп}} \quad (10)$$

Термический КПД процесса высок $\eta=90-96$ %, отличие его от 100% обусловлено, как видно из формулы (10), наличием потерь тепла на испарение воды.

Таким образом при паровой газификации графита для получения горючего газа затраты энергии на эндотермическую реакцию являются возвратными: теплотворная способность горючего газа возрастает по сравнению с теплотворной способностью графита на величину эндотермического эффекта реакции. Это приводит к тому, что несмотря на увеличение затрат энергии с ростом температуры, КПД процесса остается достаточно высоким $\eta=90-96\%$ при $T=500 \div 4000$ К.

3.2. Химическая термодинамика парокислородной газификации графита. Огневое преобразование угля, как природного объекта, сопровождается не только и не столько окислением углерода (графита), но и многочисленными сопутствующими химическими реакциями присутствующих в угле веществ. Проведен термодинамический анализ парокислородной газификации графита при вариации избытка окислителя α . Раскрыты химические реакции, протекающие в процессе газификации и горения графита. Выявлены каналы распределения энергии экзо- и эндотермических процессов. Показано, что энергия экзотермических реакций идет на компенсацию эндотермического эффекта реакции, увеличение физической теплоты системы. Затраты на эндотермическую реакцию при наработке горючих газов не являются безвозвратными, они переходят в теплотворную способность горючих газов. Определен термический КПД газификации и сжигания графита.

Проведен термодинамический анализ парокислородной газификации графита при вариации коэффициента избытка окислителя α при исходном составе



где $C_{(c)}$ – графит, (c) – конденсированное состояние, H_2O – пары воды, O_2 – молекулярный кислород. В программе ТЕРРА задается исходный состав сырья в мольных долях, давление $P=0,1$ МПа и энтальпия образования $I_{исх}$. Получены адиабатическая температура $T_{ад}$, состав продуктов реакции.

В результате парокислородной газификации графита происходят следующие реакции: разложение воды углеродом и наработка синтез газа CO и H_2 , частичное сжигание $C_{(c)}$ до CO , диоксид углерода есть результат горения $C_{(c)}$ до CO_2 , и догорания CO до CO_2 .

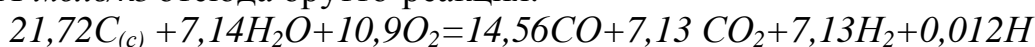
На основе полученного при расчете мольного состава продуктов реакции получим результирующие (брутто) реакции. Расщепим брутто-реакцию на составляющие (нетто) реакции. Методику анализа брутто- и нетто-реакций рассмотрим на примере при $\alpha=0,5$.

$$\alpha=0,5, \quad T_{ад}=1881 \text{ К}, \quad P=0,1 \text{ МПа}$$

Компоненты	$C_{(c)исх}$	$H_2O_{исх}$	$O_{2исх}$	CO_2	CO	H_2O	H_2	H
моль/кг	21,72	21,72	10,9	7,16	14,56	14,58	7,13	0,012

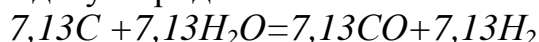
Есть дефицит воды $H_2O_{исх} - H_2O = 21,7 - 14,58 = 7,14$ моль/кг, в результате реакции получены продукты $CO_2 = 7,16$ моль/кг, $H_2 = 7,13$ моль/кг, $CO = 14,5$ моль/кг,

$H = 0,011$ моль/кг отсюда брутто-реакция:

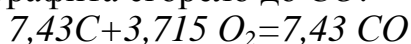


Расщепим брутто-реакцию на составляющие нетто-реакции:

реакция разложения воды углеродом:



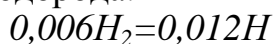
В компонентном составе $CO = 14,56$ моль/кг, это означает что $14,56 - 7,13 = 7,43$ моль/кг графита сгорело до CO :



Диоксид углерода CO_2 в количестве 7,16 моль/кг, получен в результате горения:



Реакция диссоциации водорода:



Аналогично рассуждая, найдем брутто- и нетто-реакции для всех α . Продукты, полученные в результате нетто-реакций, представлены на рис 4.

Продукт газификации CO получается в результате двух реакций – разложение воды углеродом $C_{(c)} + H_2O = CO + H_2$, и горения $C_{(c)} + 0,5O_2 = CO$

В диапазоне $0,1 < \alpha < 0,3$ CO полученное в результате реакции $C_{(c)} + H_2O = CO + H_2$ возрастает и достигает максимума. В диапазоне $0,4 < \alpha < 0,6$ возрастает массовая доля CO полученного из реакции $C_{(c)} + 0,5O_2 = CO$, далее идет снижение.

С увеличением α увеличивается доля экзотермических реакций сгорания углерода до CO и CO_2 , адиабатическая температура растет и достигает максимального значения при $\alpha=1$ ($T_{ад}=2770$ К), далее идет спад

температуры ($T_{ad}=2770\div 2175\text{ K}$ при $\alpha=1\div 4$) как уже отмечалось выше, вследствие того, что избыточный кислород является балластом снижающим температуру.

Метан CH_4 полученный в результате реакции $C_{(c)}+2H_2O=CH_4+O_2$ появляется при $\alpha=0\div 0,4$. Максимальная концентрация CH_4 достигается при $\alpha=0,1$ и адиабатической температуре $T_{ad}=750\text{ K}$.

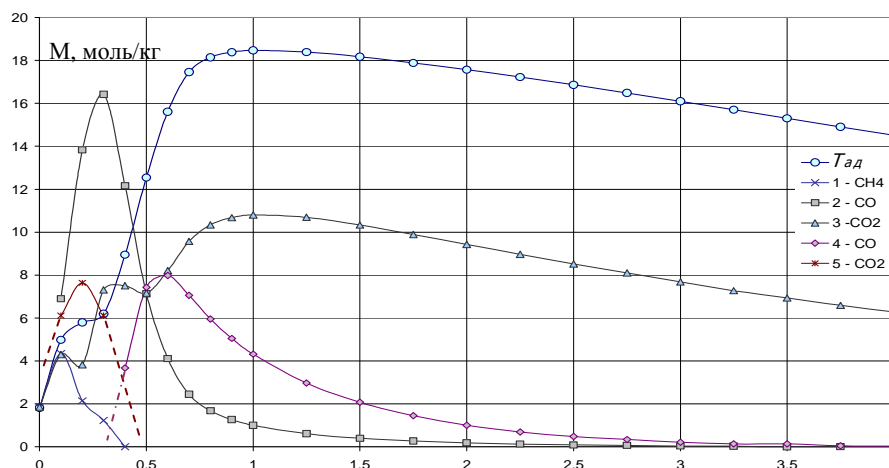
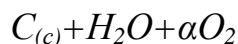


Рис. 4. Продукты полученные в процессе реакций 1 - $C_{(c)}+2H_2O=CH_4+O_2$, 2 - $C_{(c)}+H_2O=CO+H_2$; 3 - $C_{(c)}+O_2=CO_2$, 4 - $C_{(c)}+0,5O_2=CO$, 5 - $CO+0,5O_2=CO_2$, T_{ad} - адиабатическая температура [K], давление - $P=0,1\text{ МПа}$, α - коэффициент избытка окислителя - кислорода.

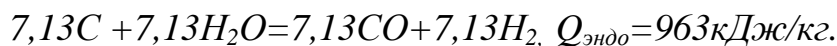
Таким образом, в результате парокислородной газификации графита



происходят следующие реакции: разложение воды углеродом и наработка синтез газа CO и H_2 , частичное сжигание $C(c)$ до CO , диоксид углерода есть результат горения $C(c)$ до CO_2 , и догорания CO до CO_2 .

Q_{xp}^t - тепловой эффект химической реакции, который дает в результате физическое тепло (теплосодержание) системы ΔH , т.е. нагрев компонентов системы с учетом их мольной доли и теплоемкости, $\Delta H \equiv |Q_{xp}|$. Величины ΔH (2689 кДж/кг для $\alpha=0,5$), Q_{xp} (2698 кДж/кг , для $\alpha=0,5$) вычисляются точно на основе расчетов по программе ТЕРРА.

Найдем каналы распределения экзо- и эндотермических процессов ($\alpha=0,5$). Имеем следующие эндотермические реакции - разложение воды графитом:



диссоциация водорода:



Экзотермические реакции - сгорание графита до окиси и двуокиси углерода:



Суммируем теплоты экзо- и эндотермических реакций $Q_{xp}^p = -2697\text{ кДж/кг.}$

Таким образом $Q_{xp}^p \equiv Q_{xp}^t$, что подтверждает правильность рассуждений о проходящих химических процессах.

Если продукты реакции не охлаждаются при последующем сжигании горючих газов, т.е. используются как потенциальное тепло горючих газов, так и физическое тепло продуктов реакции, то термический КПД газификации определяется соотношением

$$\eta = \frac{|Q_{zz}| + \Delta H}{|Q_C|}, \quad (11)$$

где Q_C - теплотворная способность графита.

С увеличением α увеличивается доля экзотермических реакций, что дает повышение адиабатической температуры T_{ad} . Максимального значения T_{ad} достигает при $\alpha=1$, далее идет снижение температуры из-за отбора тепла избыточным кислородом.

Теплотворная способность горючих газов Q_{zz} уменьшается с увеличением α . КПД потенциальной теплоты горючих газов Q_{zz} включая физическое тепло ΔH - $\eta_{Q_{zz}+\Delta H} = \frac{|Q_{zz}| + \Delta H}{|Q_C|}$ составляет величину порядка 100%.

В четвертой главе «Термодинамический анализ сжигания кремния» проведен термодинамический анализ сжигания кремния.

4.1. Баланс энергии при сжигании забалластированного топлива. На основе термодинамического анализа развита методика оценки составляющих баланса энергии при сжигании забалластированного топлива, включая теплотворную способность, теплоту сгорания, физическое тепло, потери на испарение воды, диссоциацию и недожог топлива, а также теплоту побочных эндо- и экзотермических реакций, происходящих с балластом.

Развитый метод может быть применен для прогноза режима горения и составляющих теплового баланса любых топлив и топливных систем. Он позволяет, в случае необходимости, корректировать режим горения путем введения соответствующего балласта. Например, увеличение содержания окислителя или другого нейтрального газа позволяет уменьшить адиабатическую температуру, устранить потери тепла из-за диссоциации и недожога. Особый интерес представляют присадки, проявляющие экзотермический эффект. Как, например, смесь оксидов кальция и кремния. Этот экзотермический эффект увеличивает тепловыделение в системе и позволяет соответственно уменьшить количество необходимого топлива. Целесообразно расширить поиск доступных и дешевых присадок с экзотермическим эффектом. Важное применение эти присадки могут найти в металлургии с жидким шлакообразованием при выделении металлов из руд, а также при переработке твердых бытовых отходов.

4.2. Термодинамический анализ взаимодействия кремния с водой и оксидом кальция. Вычислена адиабатическая температура и состав

продуктов химической реакции взаимодействия кремния с оксидом кальция и водой при коэффициенте избытка воды $x=0,25 \div 2$, $P=0,1$ МПа. Адиабатическая температура продуктов изменяется от $T_{ад}=1370 - 2340$ К. Основным продуктом реакции (60÷97%) является пиросиликат $Ca_3Si_2O_7(c)$, типа минерала Ранкинит с температурой плавления $T_{пл}=1750 \div 2000$ К. Теплота химической реакции до 50-70% находится в огненном шлаке. Получаемый ранкинит может использоваться в качестве огненного шлака для переработки отходов. Возможна утилизация особо опасных твердых, жидких и газовых отходов, в т.ч. медицинских, биологических, радиоактивных. Жидкий шлак извлекается истечением в виде остеклованных гранул или монолитов.

Огненный шлак оптимального состава может быть использован для наработки высокотемпературной керамики ($T_{пл}=1750 \div 2000$ К).

Другая компонента продуктов - газ водород H_2 с теплотворной способностью примерно равной теплоте химической реакции.

4.3. Экзотермический эффект при взаимодействии азота с кремнием. Проведен термодинамический анализ синтеза нитрида кремния в реакции конденсированного кремния с газообразным азотом. Исследовано влияние коэффициента избытка азота и теплообмена реагирующей системы с окружающей средой.

Реакция азота с кремнием при образовании нитрида кремния



идет с выделением тепла, т.е. с проявлением экзотермического эффекта.

Рассматривается исходная система



при давлении азота $P=0,1$ МПа, коэффициент избытка α варьировался в диапазонах $\alpha=0 \div 1$ и $\alpha=1 \div 10$.

Основные результаты приведены на рис. 5.

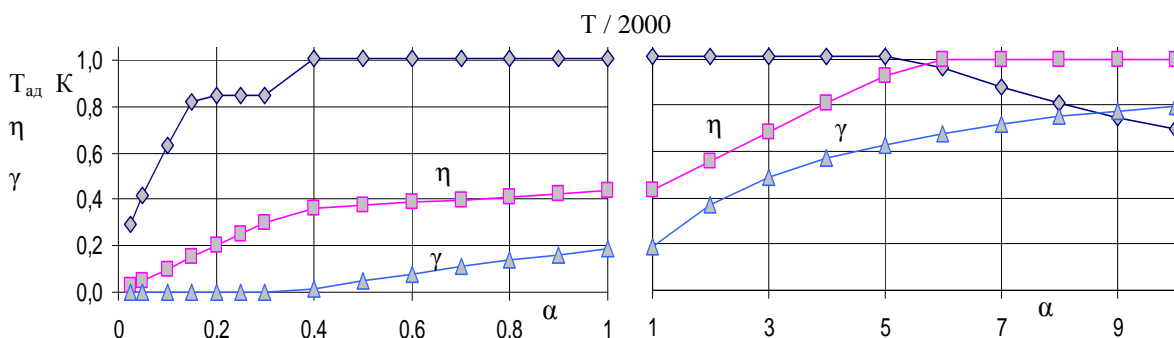


Рис. 5. Адиабатическая температура $T_{ад}$, доля образовавшегося нитрида кремния η и относительный теплосъем азотом γ в зависимости от коэффициента избытка азота α . $P=0,1$ МПа.

Адиабатическая температура $T_{ад}$ возрастает при увеличении α и достигает предельного значения $T_{пред}=T_{ад}=2017$ К для $0,4 \leq \alpha \leq 5$. Предельная температура $T_{ад}=2017$ К= $T_{разл}$ равна температуре, выше

которой нитрид кремния разлагается в азоте при $P=0,1$ МПа. Полочка на кривой $T_{ад}=1690$ К соответствует температуре плавления кремния. При увеличении $\alpha > 5$ температура понижается из-за отбора тепла азотом.

Доля кремния η , образовавшего нитрид, сложным образом зависит от α . При изменении $0 < \alpha < 0,4$ величина η пропорциональна α , весь азот идет на образование нитрида, выделяющегося тепла недостаточно для нагрева системы до $T_{пред}$. При изменении $0,4 < \alpha < 1$ наблюдается медленное увеличение η , температура уже достигла предельной, и выделяющееся тепло идет на нагрев непрореагировавшего азота, полнота использования азота 75-55%. В диапазоне $1 < \alpha < 6$ концентрация нитрида кремния быстро возрастает и достигает 100%, адиабатическая температура здесь также не превышает предельную, теплота реакции идет на нагрев избыточного азота. Величина $\eta=1$ соответствует относительному теплосъему азотом $\gamma=0,68$. Т.о. для системы 100% превращение кремния в нитрид возможно лишь при избыточном содержании азота $\alpha > 6$, который необходим для отбора тепла реакции.

При стехиометрическом соотношении система нагревается до высокой температуры, при этом адиабатическая температура оказывается на уровне температуры разложения. Так что степень превращения кремния в нитрид составляет всего 50-70%. Для понижения температуры, и соответственно повышения степени превращения до 100%, необходим либо внешний теплоотвод либо теплосъем за счет избыточного (сверхстехиометрического) количества азота. Теплоотвод и теплосъем должны составлять не менее 60% от выделяемого в реакции тепла.

4.4. Термодинамический анализ сжигания кремния. Проведен термодинамический анализ сжигания кремния в кислороде, азоте, воздухе. Определены адиабатическая температура, состав продуктов реакции и доля прореагировавшего кремния при давлении $P=0,1$ МПа и вариации коэффициента избытка окислителя. Выявлены условия достижения высшей теплоты сгорания. Теплотворная способность 1 кг кремния при сжигании в азоте $Q_{Si}=5,5$ МДж/кг, в воздухе - $Q_{Si}=7,7$ МДж/кг, в кислороде $Q_{Si}=15$ МДж/кг, (для сравнения теплотворная способность 1 кг углерода $Q_C=13$ МДж/кг). Адиабатические температуры достигают значений (при $\alpha=1$) в азоте $T_{ад}=2017$ К, в воздухе - $T_{ад}=2100$ К, $T_{ад}=3800$ К.

Описанный метод исследования и полученные результаты могут быть полезны при разработке следующих технологий.

Приготовление огненного шлака. Наиболее экономичный способ получения огненного шлака – сжигание кремния в кислороде при $\alpha=1$ с экзотермическими присадками. Одна из таких присадок - смесь диоксида кремния и оксида кальция, которые в конденсированном состоянии вступают в экзотермическую реакцию с выделением тепла



Оценка показывает, что при сжигании 1 кг кремния в кислороде ($\alpha=1$) с этой присадкой может быть получено ≈ 30 кг огненного шлака $Ca_3Si_2O_7(c)$ с температурой $T_{ад} \approx 2000$ К.

ВЫВОДЫ

Термодинамический анализ огневой переработки твердых бытовых отходов показал следующие основные результаты.

1. Развита модель огневой переработки ТБО с группировкой однотипных компонентов, переходом от теплотворной способности к энтальпии образования и термодинамическим анализом по универсальной программе ТЕРРА. Получены равновесные концентрации при адиабатической температуре, $T_{ад}=2535$ К при сжигании ТБО в кислороде и $T_{ад}=1760$ К при сжигании ТБО в воздухе. Вычислены необходимые энергозатраты, при вариации теплотворной способности ТБО, для поддержания температуры огневой переработки на уровне $T=2000$ К. Эти затраты не превышают 1 кВт·ч на 1 кг ТБО в кислороде и 1,4 кВт·ч на 1 кг ТБО в воздухе. КПД процесса газификации $\eta=74,6\div 86,4\%$ при $T=300\div 4000$ К. При сжигании ТБО с избытком окислителя $\alpha=0,3\div 1$, адиабатическая температура изменяется в диапазоне $T_{ад}=860\div 2580$ К, КПД процесса парокислородной газификации ТБО равен $\eta\approx 70\%$.

2. Проведен термодинамический анализ паровой и парокислородной газификации графита при вариации избытка окислителя α . КПД процесса газификации графита остается достаточно высоким $\eta=90-96\%$ при $T=500\div 4000$ К. При парокислородной газификации графита с избытком окислителя $\alpha=0\div 1$, адиабатическая температура изменяется в диапазоне $T_{ад}=272\div 2770$ К. КПД процесса парокислородной газификации достигает величины порядка 100%.

3. Проведен термодинамический анализ сжигания кремния в азоте, воздухе, кислороде. Адиабатические температуры достигают значений (при $\alpha=1$) в азоте $T_{ад}=2017$ К, в воздухе - $T_{ад}=2100$ К, $T_{ад}=3800$ К. При сжигании кремния получаем конденсированное состояние, что может служить основой жидкого огненного шлака. В огненном шлаке возможна утилизация особо опасных твердых, жидких и газовых отходов, в т.ч. медицинских, биологических, радиоактивных. Жидкий шлак извлекается истечением в виде остеклованных гранул или монолитов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. В.С. Энгельшт, А. Татыбеков, Р.К. Балан. Термодинамическая модель твердых бытовых отходов. Вестник КазНУ, серия физическая. №1 (19), 2005. Алматы. - С.132-139.
2. Р.К. Балан, А.Татыбеков, В.С.Энгельшт. Энтальпийный фактор огневой переработки твердых бытовых отходов. Вестник КНУ им. Ж Баласагына: Серия 5. Труды молодых ученых. –Вып. 3. Естественно-технические науки. – Бишкек. 2005. - С.18-24.
3. Балан Р.К. Баланс энергии при сжигании забалластированного топлива. Вестник ИГУ, 2005, №15, Каракол. - С. 45-51.
4. Энгельшт В.С., Балан Р.К. Экзотермический эффект при взаимодействии азота с кремнием. Бишкек. Международный семинар «Проблемы моделирования и развития технологии получения керамики». КРСУ, 2005. - С. 53-61.
5. Энгельшт В.С., Балан Р.К., Антонова Н.М. Термодинамический анализ сжигания кремния. Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. Физические исследования в Кыргызстане. Материалы Республиканской научной конференции посвященной Всемирному году физики и 80-летию профессора Л.В. Тузова. Серия 3. Естественные и технические науки. Вып. 3. Физика и техника. – Бишкек. 2005. - С. 43-48.
6. Энгельшт В.С., Балан Р.К. Баланс энергии при паровой газификации графита. Горение и плазмохимия.- Алматы: «Қазақ университеті», 2005. - С. 302-309.
7. Балан Р.К., Татыбеков А., Энгельшт В.С. Влияние температуры на газификацию твердых бытовых отходов. Известия КГТУ им. И.Раззакова, Бишкек, 2007, № 11. - С.160-166.
8. Балан Р.К., Татыбеков А., Энгельшт В.С. Термодинамический анализ газификации и сжигания твердых бытовых отходов в атмосфере кислорода. Известия НАН КР, Бишкек, 2007, №4. - С. 68-75.
9. Балан Р.К., Энгельшт В.С. Термодинамический анализ взаимодействия кремния с водой и оксидом кальция. Вестник КРСУ, 2007, т.7, №8, Бишкек. - С.23-27.
10. Балан Р.К. Компьютерное моделирование парокислородной газификации графита. Вестник КРСУ, 2009, т.9, №11, Бишкек. - С.146-152.
11. Балан Р.К. Химизм парокислородной газификации графита. Вестник ИГУ, 2009, №24, Каракол. - С. 117-123.

РЕЗЮМЕ**Балан Рената Кулукеевна****ТИРИЧИЛИКТЕГИ КАТУУ ТАШТАНДЫЛАР ӨРТТӨ КАЙРА
ИШТЕТИП ЧЫГУУДАГЫ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫК ИЗИЛДӨӨ**

деген темада 01.04.14 - Жылуулук физика жана теориялык жылуулук техника адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидатына талап кылынган диссертация

Негизги сөздөр: тиричиликтеги катуу таштандылар, термодинамикалык изилдөө, өрттөө, газ түрүнө келтирүү, адиабатикалык температура, жылуулук сактоонун түзүлүшү, жылуулук чыгаруунун жөндөмдүүлүгү, жылуулуктун күйүшү, КПД.

Тиричиликтеги катуу таштандылардын термодинамикалык модели түзүлгөн. Моделдин түзүлүшү тиричиликтеги катуу таштандылардын компоненттерин группалаштыруу жана ТЕРРА термодинамикалык эсептөөлөрдө универсалдуу программасын колдонуу. Бишкек шаарындагы тиричиликтеги катуу таштандылардын кадимки түзүлүшүн өрттөө жана газ түрүнө келтирүү үчүн термодинамикалык изилдөө жүргүзүлгөн. Адиабатикалык температурадан бир калыптагы түзүлүшү алынган.

Графитти газ түрүнө келтирүү буу жана буу кыслороддук термодинамикалык изилдөө жүргүзүлгөн. Эндотермикалык реакциясын коротууда күйүүчү газды алууда кайра калыбына кайтып келбейт, ал жылуулук күйүүсүндө күйүүчү газга өтүп кетет.

Кремнийди кыслороддо, азотто жана абада күйгүзүүдө термодинамикалык изилдөө жүргүзүлгөн. Адиабатикалык температурасын, реакциядан алынган нерсени жана кремнийдин катышкан бөлүгүн аныктадык.

РЕЗЮМЕ

Балан Рената Кулукеевна

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОГНЕВОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Ключевые слова: ТБО, термодинамический анализ, сжигание, газификация, адиабатическая температура, энтальпия образования, теплосодержание системы, теплотворная способность, теплота сгорания, КПД.

Создана термодинамическая модель ТБО. Модель основана на группировке компонентов ТБО и использовании универсальной программы термодинамических расчетов ТЕРРА. Проведен термодинамический анализ сжигания и газификации типичного состава ТБО г. Бишкек. Получены равновесные концентрации при адиабатической температуре.

Проведен термодинамический анализ паровой и парокислородной газификации графита. Показано, что затраты на эндотермическую реакцию при наработке горючих газов не являются безвозвратными, они переходят в теплотворную способность горючих газов.

Проведен термодинамический анализ сжигания кремния в кислороде, азоте, воздухе. Определены адиабатическая температура, состав продуктов реакции и доля прореагировавшего кремния.

RESUME

Balan Renata Kulukeevna

THERMODYNAMICAL ANALYSIS OF THE FIRE TREATMENT OF DOMESTIC WASTE

For the scientific degree of the candidate of specialty 01.04.14 - Thermal physics and theoretical heat engineering

Keywords: solid domestic waste, thermodynamical analysis, burning, gasification, adiabatic temperature, formation enthalpy, heat content of the system, calorificity, heat of combustion, efficiency factor.

The thermodynamical model of solid domestic waste (SDW) is created. The model is based on grouping of components of the SDW and using the universal program of thermodynamical calculations TERRA. The thermodynamical analysis of burning and gasification of typical content of the SDW of the Bishkek city is performed. The equilibrium concentrations at adiabatic temperature are obtained.

The thermodynamical analysis of steam and steam-oxygen gasification of carbon is performed. It was shown that the endothermic reaction charges at the generation of combustible gases are not irretrievable. They transfer into calorificity of the combustible gases.

The thermodynamical analysis of burning of silicon in oxygen, nitrogen, air is performed. The adiabatic temperature, the content of reaction products, and a part of the reacted silicon are determined.