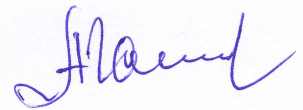


На правах рукописи



**Галькеева Айгуль Ахтамовна**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И РЕСУРСОСБЕРЕ-  
ГАЮЩЕГО СПОСОБА ГАЗИФИКАЦИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
кандидата технических наук

Казань – 2019

Диссертационная работа выполнена в ФГБУН «ФИЦ «Казанский научный центр РАН», в лаборатории «Моделирование систем производства энергии» и в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Энергетическое машиностроение»

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
**Мингалеева Гузель Рашидовна**

**Официальные оппоненты:** **Печенегов Юрий Яковлевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Энгельсский технологический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный тех-  
нический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
профессор кафедры «Технология и оборудование  
химической, нефтегазовой и пищевой промыш-  
ленности»

**Тарасов Владимир Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный  
университет имени И.Н. Ульянова», доцент ка-  
федры «Теплоэнергетические установки»

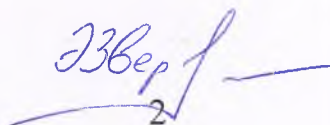
**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество «Всероссийский  
дважды ордена Трудового Красного Знамени Теп-  
лотехнический научно-исследовательский инсти-  
тут», г. Москва

Защита состоится «16» мая 2019 г., в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-225.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке, на сайте ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» <http://www.kgeu.ru/>.

Автореферат разослан «22» марта 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.082.02  
доктор технических наук



Зверева Э.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Планируемое, согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года, повышение доли угля в топливно-энергетическом балансе страны и использование «чистых» угольных технологий может осуществляться путем развития газификационных процессов и получения синтез-газа. Однако ввиду больших запасов природного газа и нефти и сложившейся экономической ситуации использование синтез-газа в качестве альтернативного топлива для производства тепловой и электрической энергии является малоэффективным. Перспективным является использование синтез-газа в качестве исходного сырья в термохимическом каталитическом синтезе широкого спектра химической продукции: метанол, аммиак, жидкие синтетические топлива, монооксид углерода и др.

Применение технологий газификации подразумевает разработку надежных методов расчета процесса в зависимости от режимных параметров, физико-химических характеристик термического превращения топлива, тепломассообменных процессов в объеме реактора и динамики движения капли водоугольного топлива (ВУТ). Решение данной задачи должно применяться на этапе проектирования газогенератора.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время отечественными и зарубежными учеными созданы научные основы процесса газификации различных видов топлив: описаны физико-химические превращения топлива, предложены различные математические модели процессов, происходящих в объеме газогенератора. В 40-60 годах прошлого века изучением газификации занимались такие ученые как Б.В. Канторович, Г.Н. Делягин, З.Ф. Чуханов и др. В последние годы разработкой и усовершенствованием процессов газификации, получения и использования водоугольного топлива занимаются Б. Хигман, А.Ф. Рыжков, Г.Г. Ольховский, Ю.В. Овчинников и др. Промышленными компаниями разработано множество газогенераторов, работающих в широком диапазоне режимных параметров. Однако до сих пор не существует единой методики расчета процессов газификации и конструктивных параметров газогенератора. Кроме того, не разработана конструкция газогенератора, в котором осуществляется аллотермический процесс бескислородной газификации водоугольного топлива за счет теплоты сгорания части полученного синтез-газа.

**Цель диссертационной работы** – разработка энергоэффективного и ресурсосберегающего способа газификации водоугольного топлива на основе математической модели тепломассообменных процессов, происходящих с движущейся частицей топлива в объеме газогенератора при наиболее целесообразных режимных параметрах.

Для достижения данной цели поставлены **следующие задачи:**

1) теоретическое исследование физико-химических закономерностей газификации ВУТ и определение наиболее целесообразных режимных параметров на основе рассчитанного состава синтез-газа.

2) разработка математической модели тепломассообменных процессов, происходящих с движущейся частицей топлива в объеме газогенератора;

3) разработка модели газогенератора, унифицированного по виду топлива, и методики конструктивного расчета;

4) экономическое обоснование практической реализации предложенного способа газификации водоугольного топлива.

**Научная новизна работы.** 1) В результате теоретического исследования термического преобразования коксового остатка выявлены химические реакции образования компонентов синтез-газа и определены их термодинамические функции.

2) На основании рассчитанного состава синтез-газа определены наиболее целесообразные режимные параметры газификации водоугольного топлива, позволяющие получить газ заданного состава для использования в термохимическом каталитическом синтезе.

3) Разработана математическая модель тепломассообмена между каплей ВУТ и потоком греющего газа в объеме газогенератора для определения количества теплоты, необходимого для термического преобразования водоугольного топлива в синтез-газ, и времени пребывания капли ВУТ в газогенераторе.

**Практическая значимость.**

1) Разработана модель поточного газогенератора с вертикальными дымогарными трубами для обеспечения теплотой процесса газификации и рассчитаны его конструктивные параметры (Патент на полезную модель №172709 от 21.07.2017 г.).

2) Разработана методика конструктивного расчета газогенератора, основанная на результатах математического моделирования процесса газификации водоугольного топлива.

3) Получены результаты расчета себестоимости синтез-газа, полученного при газификации ВУТ.

4) Результаты работы реализованы в виде практического применения методики расчета состава газов и методики конструктивного расчета газогенератора на ООО НПФ «Промприбор» и ООО «Производственная компания «МАХИМ».

**Теоретическая значимость.**

Разработанная математическая модель тепломассообмена в объеме газогенератора позволяет выявить закономерности преобразования компонентов, входящих в органическую массу угля, в присутствии водяного пара, образующегося при термическом разложении водоугольного топлива, в компоненты синтез-газа; предложенная методика является теоретической основой для создания типоразмерного ряда газогенераторов, унифицированных по виду топлива.

**Степень достоверности** полученных результатов численных исследований подтверждается применением основных законов термодинамики, тепломассообмена, мо-

лекулярно-кинетической теории газов, актуальных сертифицированных программ и вычислительных алгоритмов, а также сравнением результатов расчета с известными экспериментальными данными.

**Методология и методы исследования.** С целью решения поставленных задач были применены методы математического моделирования тепломассообменных процессов при движении частицы топлива в потоке газа, нормативный метод расчета поверхностей нагрева, метод расчета температурной зависимости термодинамических функций углеводородов, а также прикладной программный комплекс Comsol Multiphysics.

**Личный вклад автора.** Автором определены наиболее целесообразные режимные параметры процесса для получения газа заданного состава; разработана математическая модель тепломассообмена при движении капли ВУТ в потоке газа; разработана модель газогенератора, предназначенного для обеспечения эффективного аллотермического процесса бескислородной газификации ВУТ, и предложена методика конструктивного расчета.

**На защиту выносятся следующие положения.**

- 1) Результаты определения режимных параметров процесса газификации водугольного топлива в зависимости от рассчитанного состава синтез-газа.
- 2) Математическая модель тепломассообменных процессов, происходящих с движущейся каплей ВУТ в потоке греющего газа.
- 3) Результаты численного расчета по математической модели, полученные при различных входных параметрах.
- 4) Модель газогенератора с вертикальными дымогарными трубами, предназначенного для проведения аллотермического процесса газификации ВУТ и получения синтез-газа заданного состава.
- 5) Методика расчета конструктивных параметров поточного газогенератора для получения синтез-газа.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных и общероссийских конференциях, в том числе: на IX и XIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2014 г. и 2018 г.); IX школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, 2014); Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014); XV Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан» (Казань, 2015); Международной конференции: «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Казань, 2015); XIII Международной научно-практической конференции «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, 2016); ежегодных итоговых научных конференциях Казанского

научного центра Российской академии наук (Казань, 2013-2014 г). Диссертационная работа выполнена в рамках гранта РФФИ №18-79-10136.

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 14 публикациях, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus и Web of Science, 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 9 – в материалах всероссийских и международных конференций.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» и относится к следующим областям исследования:

1) разработанная математическая модель тепло- и массообменных процессов, происходящих в объеме газогенератора, соответствует п.3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло»;

2) разработка новой модели газогенератора соответствует п.4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками» и п.6 «Разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 109 наименований. Текст диссертации изложен на 157 страницах машинописного текста, включающих 26 иллюстраций, 24 таблиц и 7 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели, задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведены данные об опыте использования и перспективах применения технологии поточной газификации угля и водоугольного топлива для выработки энергии и продуктов химического синтеза, рассмотрены современные технологии и оборудование для получения синтез-газа, проведен литературный обзор поточных реакторов газификации. Также рассмотрены технологические основы получения химических продуктов (метанол, жидкие синтетические топлива, монооксид углерода, аммиак) из синтез-газа и требования к составу газа и режимным условиям. Выявлено, что известные методики расчета процесса газификации обладают ограничениями в применимости и не дают полной картины описания процессов, происходящих в объеме газогенератора, и поставлена основная задача исследования – разработка математической модели газификации водоугольного топлива, которая дает представление о тепло-массообменных процессах, происходящих с каплей ВУТ в объеме газогенератора и позволяет рассчитать его конструктивные параметры.

**Во второй главе** исследованы физико-химические основы процесса термического разложения водоугольных топлив. На основании материального баланса по элементам, входящим в состав исходного топлива, автором предложена система уравнений для определения количества летучих, которые представляют собой CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S:

1. 
$$\frac{g_m \cdot \omega_{H_2}}{M_{H_2}} = v_{H_2} + v_{H_2O} + v_{CH_4};$$
2. 
$$\frac{g_m \cdot \omega_C \cdot \omega_{Cлет}}{M_C} = v_{CO} + v_{CO_2} + v_{CH_4};$$
3. 
$$\frac{g_m \cdot \omega_{O_2}}{M_{O_2}} = v_{CO} + v_{H_2O} + v_{CO_2};$$
4. 
$$\frac{g_m \cdot \omega_{S_2}}{M_S} = v_{H_2S}$$
5. 
$$M_{CO} \cdot v_{CO} + M_{H_2O} \cdot v_{H_2O} + M_{CO_2} \cdot v_{CO_2} + M_{H_2} \cdot v_{H_2} + M_{CH_4} \cdot v_{CH_4} = g_m \cdot V_{лет}^P;$$
6. 
$$v_{CO} + v_{H_2O} + v_{CO_2} + v_{H_2} + v_{CH_4} = v_{лет},$$

где  $g_m$  – расход топлива, кг/ч;  $\omega_C, \omega_{H_2}, \omega_{O_2}, \omega_{S_2}$  – доля углерода, водорода, кислорода и серы, соответственно, в горючей массе топлива;  $\omega_{Cлет}$  – доля углерода в составе летучих;  $M_C, M_{H_2}, M_{O_2}, M_S$  – молярные массы углерода, водорода, кислорода и серы, соответственно, кг/моль;  $v_{CO}, v_{CO_2}, v_{H_2}, v_{H_2O}, v_{CH_4}, v_{H_2S}$  – количества монооксида углерода, диоксида углерода, водорода, воды, метана и сероводорода, соответственно, моль;  $M_{CO}, M_{CO_2}, M_{H_2}, M_{H_2O}, M_{CH_4}$  – молярные массы монооксида углерода, диоксида углерода, водорода, воды и метана, соответственно, кг/моль;  $V_{лет}^P$  – выход летучих на рабочую массу;  $v_{лет}$  – количество летучих, моль.

Реакции газификации водоугольного топлива представляют собой совокупность гомогенных и гетерогенных взаимодействий компонентов газовой фазы и коксового остатка. Возможность протекания реакций разложения ароматических соединений, моделирующих органическую структуру кокса, была оценена путем расчета энергии Гиббса по аддитивной методике, основанной на определении параметров в зависимости от гибридных состояний атомов. В результате расчетов были получены отрицательные значения энергии Гиббса, что доказывает возможность протекания реакций при условиях, характерных для газификации в потоке – в диапазоне температур 800-1400°C и атмосферном давлении.

Для оценки возможности использования синтез-газа, полученного при газификации различных углей и водоугольных топлив, в энергетической и химической промышленности автором был проведен расчет состава и свойств с применением программного комплекса Comsol Multiphysics при различных режимных параметрах. С целью получения точных данных расчет состава синтез-газа велся для зоны термохимического реагирования коксового остатка и газообразных соединений с учетом количественного состава летучих компонентов и кокса. При определении изменений концентраций исходных компонентов смеси также учитывались кинетические характеристики процесса, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Химические реакции газификации и их параметры

| № п/п | Уравнения реакций    | Энергия активации, $E_a$ , Дж/моль | Фактор столкновения, $A$ , $c^{-1}$ |
|-------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1     | $C+O_2=CO_2$         | 113000                             | 11000                               |
| 2     | $2C+O_2=2CO$         | 118000                             | 12000                               |
| 3     | $C+H_2O=CO+H_2$      | 155226                             | $1,05 \cdot 10^6$                   |
| 4     | $C+2H_2O=CO_2+2H_2$  | 181400                             | $1,6 \cdot 10^6$                    |
| 5     | $C+2H_2=CH_4$        | 113000                             | 1000                                |
| 6     | $C+CO_2=2CO$         | 214000                             | 790000                              |
| 7     | $2CO+O_2=2CO_2$      | 42700                              | 222                                 |
| 8     | $CO+H_2O=CO_2+H_2$   | 138300                             | $4,2 \cdot 10^7$                    |
| 9     | $CH_4+CO_2=2CO+2H_2$ | 195300                             | 100000                              |
| 10    | $CH_4+H_2O=CO+3H_2$  | 138300                             | $4,2 \cdot 10^7$                    |

$$7. \quad r_3 = A_3 \exp(-E_3 / RT) \cdot c_{H_2O} \cdot c_C$$

$$8. \quad r_4 = A_4 \exp(-E_4 / RT) \cdot c_{H_2O}^2 \cdot c_C$$

$$9. \quad r_5 = A_5 \exp(-E_5 / RT) \cdot c_{H_2}^2 \cdot c_C$$

$$10. \quad r_6 = A_6 \exp(-E_6 / RT) \cdot c_{CO_2} \cdot c_C$$

$$11. \quad r_8 = A_8 \exp(-E_8 / RT) \cdot c_{H_2O} \cdot c_{CO} - \frac{A_8 \exp(-E_8 / RT)}{K_{eq8}} \cdot c_{CO_2} \cdot c_{H_2}$$

$$12. \quad r_9 = A_9 \exp(-E_9 / RT) \cdot c_{CH_4} \cdot c_{CO_2} - \frac{A_9 \exp(-E_9 / RT)}{K_{eq9}} \cdot c_{CO}^2 \cdot c_{H_2}^2$$

$$13. \quad r_{10} = A_{10} \exp(-E_{10} / RT) \cdot c_{CH_4} \cdot c_{H_2O} - \frac{A_{10} \exp(-E_{10} / RT)}{K_{eq10}} \cdot c_{CO} \cdot c_{H_2}^3$$

С целью определения равновесных концентраций продуктов реакций газификации, были определены скорости обратимых и необратимых реакций, представленных в таблице 1, по уравнениям 7-13. Для бескислородной газификации ВУТ характерно протекание

реакций 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, представленных в таблице 1. Результаты расчета представлены на рисунке 1. Установлено, что для обеспечения оптимального времени процесса и полноты протекания реакций, газификацию водоугольного топлива целесообразно проводить при температуре 1150 К. При данной температуре время превращения составляет порядка 3 с., что согласуется с экспериментальными данными. Меньшее значение температуры ведет к

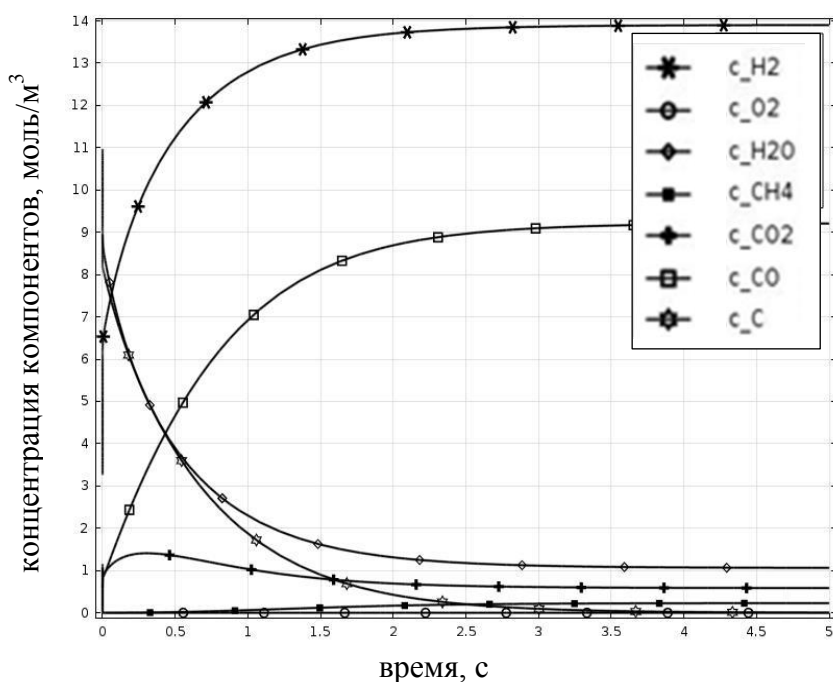


Рисунок 1. Изменение концентрации исходных компонентов и продуктов газификации при 1150К



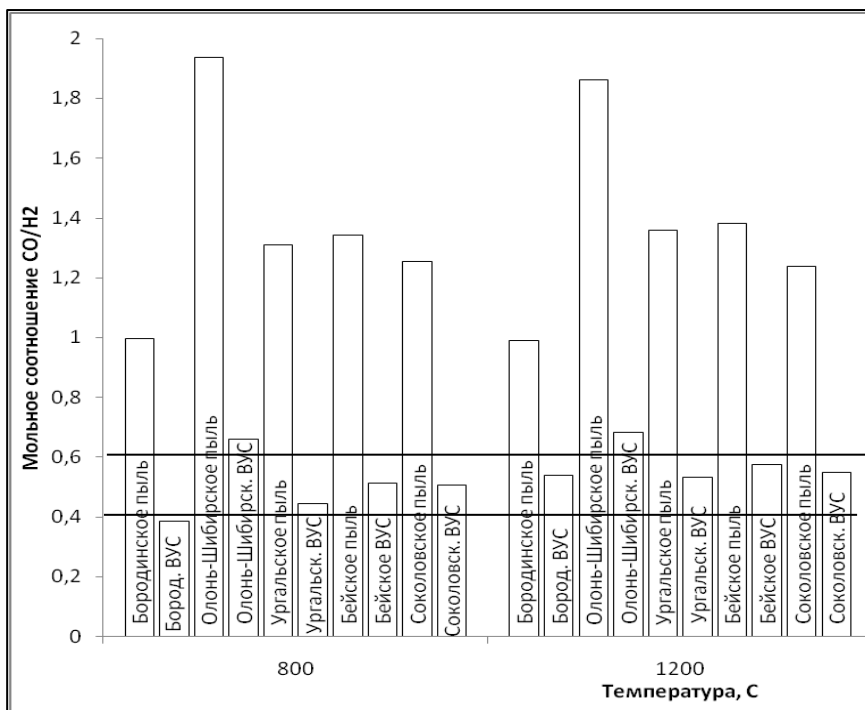


Рисунок 2. Мольное соотношение  $CO/H_2$  в синтез-газе: выделенная область – зона наиболее целесообразного соотношения компонентов

др., является целесообразным при определенном составе газа. Для большинства химических производств соотношение  $CO/H_2$  должно находиться в пределах 0,4-0,6. Расчетные данные (рисунок 2) показывают, что синтез-газ, образующийся при газификации ВУТ, удовлетворяет этим требованиям и может быть использован для дальнейшего преобразования.

Процесс газификации ВУТ может осуществляться как с внешним подводом окислителя (кислород, воздух, паровоздушная и парокислородная смеси, углекислый газ и т.д.), так и без повода окислителя. В процессе бескислородной газификации термохимическое превращение топлива осуществляется за счет взаимодействия компонентов угля и влаги, входящей в ВУТ.

В отличие от кислородной газификации ВУТ при бескислородной отсутствуют реакции полного и неполного горения углерода и водорода, которые являются экзотермическими и протекают с высокой скоростью. В случае кислородной газификации практически весь углерод топлива. При этом пар недостаточно реагирует с компонентами угля и его содержание в газе достаточно велико. При бескислородной газификации водоугольного топлива вследствие протекания эндотермических реакций пара с компонентами угля образуется значительно большее количество водорода, при этом количество самого пара значительно сокращается в сравнении с исходным количеством его в ВУТ, что является наиболее целесообразным с точки зрения получения газа, где целевыми компонентами являются монооксид углерода и водород.

увеличению времени пребывания частицы топлива в объеме реактора, и, следовательно, его габаритных размеров, а достижение более высоких температур в реакционной зоне является энергозатратным для эндотермического процесса. Использование синтез-газа в качестве исходного компонента для каталитического термохимического синтеза химических веществ, таких как аммиак, метанол, жидкие синтетические топлива и

**В третьей главе** разработана математическая модель бескислородной газификации водоугольного топлива с учетом процессов тепло- и массообмена между движущейся в объеме реактора каплей ВУТ и потоком горячего газа.

В физической постановке задачи капля ВУТ после распыла механической форсункой попадает в среду горячего синтез-газа, который нагревается за счет теплоотдачи от пучка жаровых труб, внутри которых циркулируют продукты сгорания части образующегося синтез-газа. Условно капля проходит 3 зоны реактора: испарение влаги, выделение летучих и термическое реагирования компонентов смеси.

В каждой зоне имеет место тепломассообмен между каплей ВУТ и окружающей средой. Для обеспечения оптимальных результатов газификации и необходимо поддерживать температуру в объеме газогенератора на уровне 1150К, что обосновано во 2 главе диссертации.

В ходе расчета по математической модели было определено количество теплоты, переданной от дымогарных труб к газовой среде, для поддержания режимных условий на заданном уровне. Оценка длины пути, который преодолевает капля ВУТ в процессе своего превращения, осуществляется на основании определения потери скорости капли за счет массообмена и действующих на каплю сил.

Математическая модель тепломассообменных процессов, происходящих с каплей водоугольного топлива в потоке горячего синтез-газа, состоит из следующей системы уравнений 14-19:

$$14. \quad Q_{mp} = \sum_{i=1}^n (c_p m (T_0 - T_1))_i$$

$$15. \quad \sum_{i=1}^b G_{i\_вход} = \sum_{i=1}^k G_{i\_выход}$$

$$16. \quad \frac{dQ_{mp}}{d\tau_{исп}} = \alpha_T F (T_2 - T_k)$$

$$17. \quad \frac{dm_k}{d\tau_{диф}} = \beta S_{нов} (C_{нов} - C_2)$$

$$18. \quad m_k \frac{du}{d\tau_{диф}} = \sum_{i=1}^l F_i + u \frac{dm_k}{d\tau_{диф}}$$

$$19. \quad L = u \tau_i + \frac{a \tau_i^2}{2},$$

где  $Q_{mp}$  – требуемое количество теплоты на испарение влаги ВУТ (выход летучих), Дж;  $n$  – количество расчетных зон газогенератора;  $T_0, T_1, T_2, T_k$  – температуры греющего газа на входе в расчетную зону, на выходе из расчетной зоны, капли ВУТ и газа, соответственно, К;  $c_{pi}$  – удельная теплоемкость компонентов, Дж/кг·К;  $m_i$  – массы компонентов, кг;  $G$  – расход компонентов смеси, кг/с;  $b$  – количество исходных веществ,  $k$  – количество продуктов;  $\tau_{исп}$  – время испарения влаги/летучих компонентов, с;  $\tau_{диф}$  – время диффузии влаги/летучих компонентов в газ, с;  $\tau_i$  – время пребывания капли ВУТ/частицы в расчетной зоне, с;  $m_k$  – масса капли ВУТ, кг;  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи от газа к капле ВУТ, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S_{нов}$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>;  $l$  – количество сил, действующих на каплю;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $C_{нов}, C_2$  – концентрация испаряющихся веществ у поверхности испарения и в греющем газе, кг/м<sup>3</sup>;  $\sum F$  – сумма сил, действующая на каплю ВУТ, Н,  $u$  – скорость капли ВУТ, м/с;  $a$  – ускорение капли ВУТ м/с<sup>2</sup>;  $L$  – длина зоны, м.

Уравнения теплового и материального балансов, тепло- и массоотдачи, движения капли с переменной массой и равноускоренного движения наиболее полно описывают процессы, происходящие с каплями ВУТ в зонах испарения влаги и выделения летучих компонентов. Система уравнений 14-19 решалась методом последовательных приближений.

Решением уравнения теплового баланса (14) для зоны испарения влаги является определение количества теплоты, требуемой для испарения влаги, прогрева частицы топлива до температуры испарения и нагрева пара до температуры окружающей среды:

$$Q_{mp1} = r m_{H_2O} + c_{к0} m_{к0} (T_{исп} - T_0) + c_{H_2O} m_{H_2O} (T_{CG} - T_{исп}), \quad (20)$$

где  $m_{H_2O}$ ,  $m_{к0}$  – масса капли ВУТ и пара, кг;  $c_{H_2O}$ ,  $c_{к0}$  – удельная теплоемкость капли ВУТ и пара, Дж/(кг·К);  $r_{H_2O}$  – теплота парообразования воды, Дж/кг;  $T_{исп}$ ,  $T_{CG}$  – температуры испарения влаги и окружающего газа, К.

Для зоны выхода летучих компонентов определяется количество теплоты, необходимое для их испарения и нагрева частицы и летучих компонентов до температуры окружающей среды:

$$Q_{mp2} = r_{H_2O} m_{H_2Oл} + r_{CH_4} m_{CH_4л} + c_{к0к} m_{к0к} (T_{CG} - T_{вых.л}) + c_{лет} m_{лет} (T_{CG} - T_{вых.л}), \quad (21)$$

где  $m_{H_2Oл}$ ,  $m_{CH_4л}$ ,  $m_{к0к}$ ,  $m_{лет}$  – масса влаги и метана, содержащихся в летучих компонентах, коксовой частицы и летучих компонентов, кг;  $c_{к0к}$ ,  $c_{лет}$  – удельная теплоемкость коксовой частицы и летучих компонентов, Дж/(кг·К);  $r_{CH_4}$  – теплота парообразования метана, Дж/кг;  $T_{вых.л}$  – температура выхода летучих, К.

Для зоны термохимического реагирования компонентов смеси на основе теплового баланса (14) определяется температура синтез-газа на выходе из газогенератора:

$$T_{ГГЗ} = \frac{c_{CG2} \cdot m_{CG2} \cdot T_{CG} + c_{л2} \cdot m_{л2} \cdot T_{CG} + c_{к0к} \cdot m_{к0к} \cdot T_{CG} + Q_{x.p.1к}}{c_{см} \cdot m_{см}}, \quad (22)$$

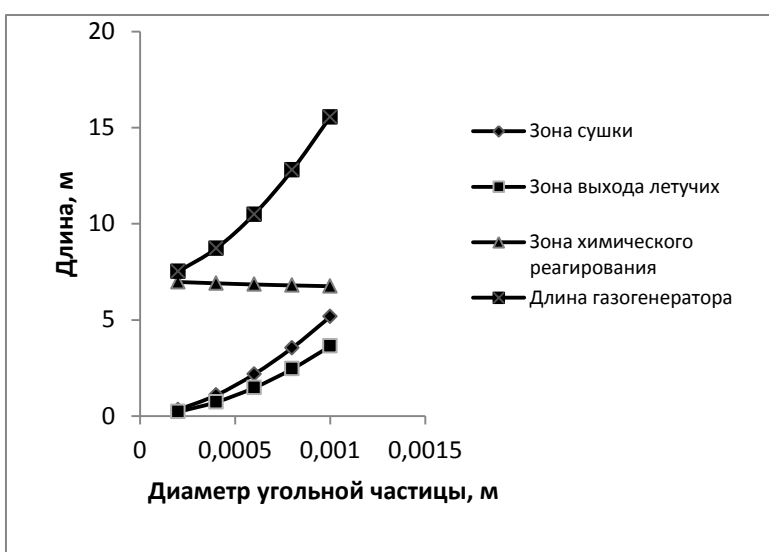


Рисунок 3. Зависимость длины условных зон газогенератора от размеров капли ВУТ на выходе из форсунки

где  $Q_{x.p.1к}$  – суммарный тепловой эффект реакций газификации на 1 каплю ВУТ, Дж;  $Q_{x.p.сумм}$  – суммарный тепловой эффект реакций газификации, Дж;  $m_{мольр}$  – масса всех молей реагентов (продуктов) реакций паровой газификации в соответствии со стехиометрическими коэффициентами, кг/моль;  $c_{см}$  – удельная теплоемкость реакционной смеси,

Дж/(кг·К);  $m_{см}$  – масса компонентов реакционной смеси ВУТ и пара, кг.

Уравнения тепло- (16) и массоотдачи (17) решаются с применением теории подобия по известным зависимостям с учетом механизма преобразования капли ВУТ.

Расчет скорости капли (частицы) переменной массы, движущейся в потоке горячего газа, по уравнению (18) основывается на определении сил, действующих на каплю (частицу).

В результате расчета по математической модели определено, что на длину всех реакционных зон, а, соответственно, и на длину всего газогенератора могут оказывать влияние различные факторы, как режимные (температура), так и технологические (размер капель, скорость капли на выходе из форсунки).

Диаметр капли ВУТ, распыливаемой форсункой, оказывает значительное влияние на длину зоны сушки и выхода летучих (рис. 3). Это объясняется необходимостью увеличения времени для протекания процессов, происходящих с движущейся каплей в соответствующих зонах.

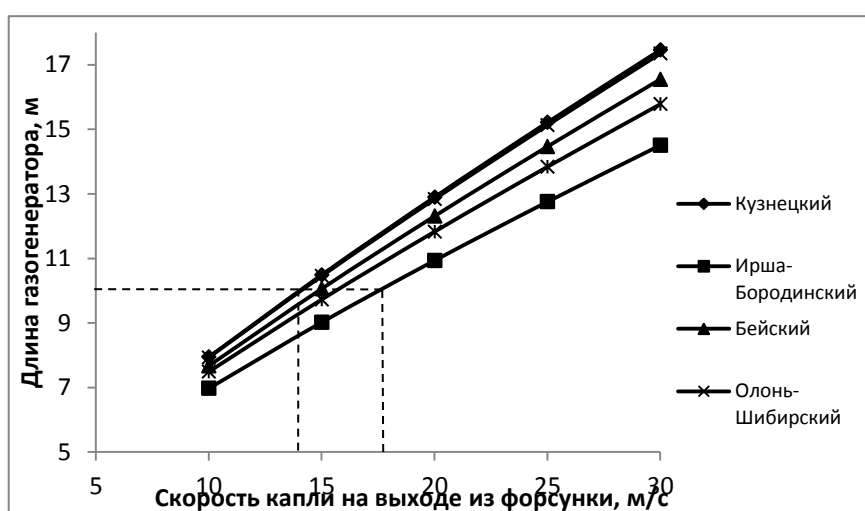


Рисунок 4. Зависимость длины газогенератора от скорости капли на выходе из форсунки

При увеличении скорости капли на выходе из форсунки увеличивается длина газогенератора (рис. 4). При заданной температуре газификации необходимо обеспечить определенное время нахождения капли ВУТ в объеме газогенератора для осуществления ее

термического преобразования в синтез-газ вне зависи-

мости от скорости движения, поэтому в процессе математического моделирования необходимо выявить такую скорость капли на выходе из форсунки, при которой будет обеспечиваться необходимое время пребывания капли ВУТ в газогенераторе при приемлемых габаритных размерах реактора газификации.

Пунктирной линией на рис.4 показано, что варьируя скорость капли ВУТ на выходе из форсунки, можно достичь определенного значения длины газогенератора вне зависимости от марки угля, тем самым решив задачу унификации газогенератора по виду топлива.

При сопоставлении графиков зависимости длины газогенератора от размеров капли ВУТ и скорости на выходе из форсунки автором установлено, что при диаметре капли ВУТ  $\sim 0,6$  мм (на что указывают данные, приведенные в научных трудах Делягина) для обеспечения расчетного времени протекания процессов испарения влаги, вы-

хода летучих и термохимического реагирования компонентов смеси необходимо обеспечить скорость капли на выходе из форсунки 14-18 м/с.

**В четвертой главе** разработана конструкция газогенератора с вертикальными поверхностями нагрева (Патент на полезную модель №172709 от 21.07.2017 г.), выполненными в виде дымогарных труб с циркулирующими внутри них горячими продуктами сгорания части получаемого при газификации ВУТ синтез-газа (рис. 5).

Между вертикальными дымогарными трубами и газовой средой в объеме газогенератора происходит теплообмен, необходимый для обеспечения теплотой всех стадий бескислородной газификации ВУТ.

Газогенератор работает следующим образом. ВУТ подводится по трубопроводу в кольцевой коллектор 8 и распыляется форсунками 7 в среду синтез-газа, находящегося

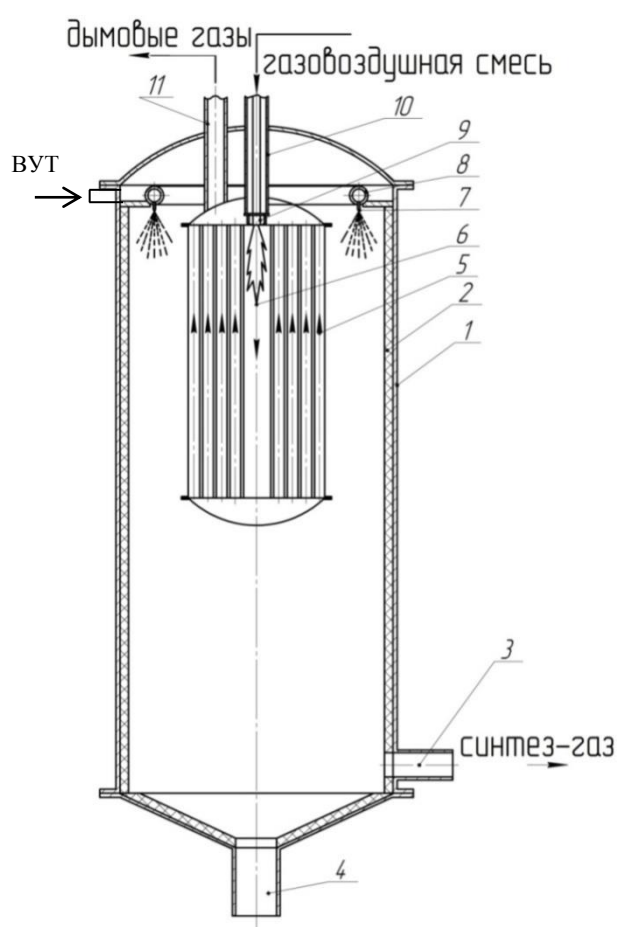


Рисунок 5. Поточный газогенератор.

1 – корпус; 2 – футеровка; 3 – патрубок для отвода синтез-газа; 4 – патрубок для отвода шлака; 5 – дымогарные трубы; 6 – жаровая труба; 7 – форсунки ВУТ; 8 – кольцевой коллектор; 9 – горелка; 10 –подвод газовой смеси; 11 –отвод дымовых газов.

при температуре 1150 К. Часть синтез-газа отводится из патрубка 3, охлаждается, очищается и вместе с воздухом направляется через подвод 10 на сжигание в жаровую трубу 6. С помощью горелки 9 осуществляется стабильная подача газовой смеси и ее горение в жаровой трубе 6. Образующиеся дымовые газы поднимаются вверх по дымогарным трубам 5 и отводятся через патрубок 11. Синтез-газ, заполняющий газогенератор, нагревается посредством теплопередачи от горячих дымовых газов, проходящих в трубах 5. В результате температура в газогенераторе становится достаточной для проведения газификации ВУТ, где в качестве окислителя выступает влага, содержащаяся в ВУТ. Образующийся в процессе газификации синтез-газ отводится через патрубок 3, а шлак через отвод 4 поступает в систему золошлакоудаления.

На основании проведенных исследований был разработан алгоритм методики конструктивного расчета газогенератора, который включает пять последовательных связанных между собой этапов: расчет количества летучих компонентов; расчет состава синтез-газа и

определение наиболее целесообразных режимных параметров для получения газа определенного состава; расчет тепломассообменных процессов в объеме газогенерато-

ра, определение длины реакционной зоны и времени протекания процесса газификации; разработка конструкции газогенератора с вертикальными поверхностями теплообмена для обеспечения необходимым количеством теплоты всего процесса, и проведение конструктивного расчета; определение технико-экономических показателей процесса газификации ВУТ.

Результаты конструктивного расчета показывают, что для обеспечения необходимого времени пребывания частицы ВУТ в объеме газогенератора необходимо обеспечить определенную длину реактора вне зависимости от производительности по газу. В таблице 2 представлены результаты конструктивного расчета газогенератора при различной производительности по газу.

Таблица 2. Конструктивные расчеты газогенератора

| Производительность по газу, м <sup>3</sup> /час | Объем газогенератора, м <sup>3</sup> | Количество трубок, шт. | Диаметр газогенератора, м |
|---|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| 500   | 54,91                                | 365                    | 2,28                      |
| 1000  | 112,83                               | 750                    | 3,27                      |
| 1500  | 171,5                                | 1140                   | 4,03                      |

При расчете себестоимости синтез-газа, полученного при бескислородной и кислородной газификации водугольного топлива и

кислородной газификации угля, и срока окупаемости проекта бескислородной газификации ВУТ при реализации синтез-газа по рыночной стоимости природного газа учитываются затраты, представленные в таблице 3. При расчете технико-экономических показателей для случая бескислородной газификации учитываются капиталовложения в дымогарные трубки из жаростойкой стали.

Таблица 3. Экономические показатели производства топлива

| Технико-экономический параметр                        | Синтез-газ   |                  |                  |
|---|--------------|------------------|------------------|
|   | Из ВУТ       | Из угольной пыли | Из ВУТ (Тексако) |
| Капитальные затраты, руб., включая:                   | 15 796 865,4 | 21 702 481       | 19582862         |
| - газогенератор                                       | 10 187 796,6 | 9 875 161        | 7973793,4        |
| - вспомогательное оборудование                        | 5 609 069    | 11 827 320       | 11609069         |
| Эксплуатационные затраты, руб/год, включая:           | 13 954 651,1 | 22 207 552       | 20045305         |
| - оплата труда  | 2 343 600    | 2 343 600        | 2 343 600        |
| - электроэнергия                                      | 3 841,391,2  | 9 534 515,4      | 9 534 515,4      |
| - затраты на топливо                                  | 6 110 989    | 8 230 677        | 6 110 989        |
| - техническое обслуживание                            | 315 937,3    | 434 049,6        | 391 657,25       |
| - амортизация   | 1 342 733,6  | 1 844 710,9      | 1 664 543,3      |
| Годовое производство синтез-газа, м <sup>3</sup> /год | 4 380 000    | 4 380 000        | 4 380 000        |
| Себестоимость синтез-газа, руб/м <sup>3</sup>         | 3,18         | 5,07             | 4,58             |
| Годовая стоимость синтез-газа, руб/год                | 13 928 400   | 22 206 600       | 20 060 400       |

Таким образом, производство синтез-газа из ВУТ является экономически выгодным, а также решает вопросы ресурсосбережения ввиду экономии как самого угля, так и природного газа при производстве химических продуктов. Энергоэффективность предложенного способа газификации водоугольного топлива достигается путем экономии электроэнергии на привод оборудования в первую очередь ввиду отсутствия стадии получения кислорода из воздуха, что является энергозатратным и дорогостоящим процессом.

При реализации синтез-газа по стоимости природного газа для предприятий (4,53 руб/м<sup>3</sup>) и ставке по кредиту 11% годовых срок окупаемости проекта составит 3,48 лет. При этом следует учесть, что дальнейшая термохимическая переработка синтез-газа с целью получения широкого спектра химической продукции может быть упрощена ввиду отсутствия стадии конверсии метана в синтез-газ.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В результате выполнения диссертационной работы:

- проведен анализ современного состояния технологии газификации в России и за рубежом; определены наиболее перспективные направления использования синтез-газа, полученного из угля, – в качестве исходного сырья в термохимическом каталитическом синтезе;

- в результате теоретического исследования физико-химических закономерностей термического преобразования коксового остатка выявлены химические реакции образования компонентов синтез-газа и определены их термодинамические функции;

- предложен способ бескислородной газификации ВУТ, включающий разработку конструкции газогенератора и методики его расчета, который обеспечивает получение синтез-газа с заданным составом и свойствами, необходимыми для дальнейшей переработки – соотношение монооксида углерода к водороду в газе составляет 0,4-0,6;

- обоснованы наиболее целесообразные режимные условия проведения процесса для обеспечения его эффективности и экономичности – проведение процесса газификации ВУТ без подвода окислителя и поддержание температуры в объеме газогенератора на уровне 1150К;

- разработана математическая модель теплообмена между каплей ВУТ и потоком греющего газа в объеме газогенератора, позволяющая определить количество теплоты, необходимое для термического преобразования водоугольного топлива в синтез-газ, время пребывания капли ВУТ в реакционном объеме и длину газогенератора.

- получены зависимости, доказывающие, что при вариации определенных исходных параметров достигается унификация процесса по виду топлива;

- разработана новая модель газогенератора, оснащенная вертикальными поверхностями теплообмена, для обеспечения необходимым количеством теплоты всех стадий

газификации, и проведен конструктивный расчет газогенератора при различной производительности по синтез-газу;

- в результате проведенной технико-экономической оценки доказана экономическая эффективность бескислородной газификации ВУТ в сравнении с кислородной газификацией угля – себестоимость полученного газа составляет 3,18 руб/м<sup>3</sup>, а срок окупаемости с учетом переплат по кредиту – 3,48 лет.

Работа принята к практическому использованию в ООО НПФ «Промприбор» и ООО «Производственная компания «МАХИМ».

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*В изданиях из перечня ВАК РФ:*

1. Афанасьева О.В. Перспективные направления переработки угля камского бассейна / О.В.Афанасьева, А.А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева // Энергетика Татарстана. 2014. №3-4. С.46-50.

2. Галькеева А.А., Мингалеева Г.Р. Возможности промышленного использования генераторного газа / А.А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №11-12. С. 22-31.

3. Галькеева А.А. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов / А.А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 69-79.

4. Мингалеева Г.Р. Перспективы использования технологических газов, полученных путем переработки твердых топлив и природных битумов, в химической промышленности Поволжья / Г.Р. Мингалеева, Д.В. Ермолаев, О.В. Афанасьева, А.А. Галькеева, А.А. Морев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №9-10. С. 73-82.

*В изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:*

5. Mingaleeva G.R. Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels / G.R. Mingaleeva, D.V. Ermolaev, A.A. Galkeeva // Clean Technologies and Environmental Policy. 2016. Vol. 18. pp. 297-304. DOI: 10.1007/s10098-015-0988-8.

*Патенты и свидетельства о регистрации:*

6. Пат. №172709 Рос. Федерация: Газогенератор для бескислородной газификации водоугольного топлива / Галькеева А.А., Мингалеева Г.Р. №2017104062 заявл. 07.02.2017. опубл. 21.07.2017. Бюл. №21. 7 с.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016610023 Рос. Федерация: FragCalc: / Халитова Г.Р., Ермолаев Д.В., Галькеева А.А. №2015660629. заявл. 06.11.2015. зарегистр. 20.02.2016. 1 с. и другие.