

*На правах рукописи*



**АЛЕШИНА**  
Алена Сергеевна

**ГАЗИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ В  
ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ**

**Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика**

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2013**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Атомная и тепловая энергетика»

- Научный руководитель      **Сергеев Виталий Владимирович**  
доктор технических наук, доцент
- Официальные оппоненты: **Куколев Максим Игоревич**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет», профессор
- Белоусов Владимир Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский государственный технологиче-  
ский университет растительных полимеров», доцент
- Ведущая организация      ОАО «Научно-производственное объединение по ис-  
следованию и проектированию энергетического обо-  
рудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)  
(Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 18 июня 2013 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан "14" мая 2013 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 552 89 45

E-mail: [kg1210@mail.ru](mailto:kg1210@mail.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета



К. А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Мировое потребление энергии постоянно увеличивается по ряду причин, основные из которых – рост численности населения, улучшение качества жизни, индустриализация и быстрый экономический рост развивающихся стран. Ограниченность традиционных топливных ресурсов и прогнозы об их скором исчерпании заставляют задуматься о поиске альтернативных источников энергии. Роль энергетики на основе возобновляемых ресурсов (энергия солнца, энергия ветра, энергия биомассы и т. д.) неуклонно растет.

В Европе утверждена Стратегия развития энергетики на основе биомассы<sup>1</sup>, в которой предусматривается использование древесного сырья для производства топлив для автотранспорта, а также генерация на ее основе тепловой и электрической энергии.

В российской Программе «БИО-2020»<sup>2</sup> прогнозируется, что наша страна может стать одним из лидеров мирового рынка биоэнергетики за счет использования своих ресурсов. «В России образуется более 100 млн. тонн доступных для получения энергии отходов биомассы в год, энергетическая ценность которых составляет более 300 млн. МВт·ч, или более 40 млн. т. у. т. При этом утилизируется не более 10 % из них... Поэтому перед энергетической отраслью стоит задача поэтапного создания новых правовых и технологических подходов в биоэнергетике, которые будут поддерживаться и стимулироваться государством».

Отдельные разделы настоящей работы выполнялись в рамках гранта в виде стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов для обучения за рубежом в 2011/2012 учебном году (приказ Минобрнауки России № 2057 от 23.06.2011 г.) на базе Лаппеенрантского технологического университета, Финляндия, а также при поддержке Правительства Санкт-Петербурга в виде грантов для студентов и аспирантов (дипломы: серия ПСП № 09006, серия ПСП № 101112).

**Степень разработанности темы исследования.** Развитие газогенераторных технологий идет по трем направлениям: слоевая газификация, газификация в кипящем слое и газификация в потоке. Для газификации растительной биомассы применяются в основном слоевые газогенераторы и газогенераторы с кипящим слоем. Наша страна имеет значительный накопленный опыт в области слоевой газификации растительной биомассы. В работах Б. В. Канторовича, Д. Б. Гинзбурга, В. В. Померанцева, Л. В. Зысина, В. В. Сергеева и др. изложены методологические основы промышленной слоевой газификации растительного сырья. В основном использование биомассы в слоевых газогенераторах предлагалось для гарантированного энергоснабжения децентрализованных потребителей. Максимальная мощность таких аппаратов не превышает 5 МВт. Однако для внедрения газогенератор-

<sup>1</sup> European Biomass Action Plan (COM(2005) 628 final), 7.12.2005

<sup>2</sup> Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена Председателем Правительства РФ 24.04.2012 г. № 1853п-П8

ных технологий в большую энергетику необходимо увеличение единичной мощности аппаратов, повышение эффективности технологического процесса и поиск оптимального решения как с технической, так и с экономической точки зрения.

**Целью работы** является разработка моделей процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- проведено исследование технологии и аппаратов газификации растительной биомассы в кипящем слое;
- выбраны основные реакции процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя;
- проведены экспериментальные исследования с целью подтверждения адекватности разработанных моделей;
- определена область внедрения технологии газификации растительной биомассы в кипящем слое в промышленную теплоэнергетику;
- разработана технологическая схема получения синтетического природного газа на основе процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

#### **Научная новизна**

- Разработаны модели процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.
- Получены экспериментальные данные по составу генераторного газа при воздушной газификации растительной биомассы в аппаратах кипящего слоя.
- Разработана технологическая схема получения синтетического природного газа на основе процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

**Методология исследования.** Проведенные исследования базировались на сочетании расчетных методов, основанных на фундаментальных термодинамических, физико-химических и технических представлениях о тепловых процессах в промышленных энергетических установках, работающих на растительной биомассе, с получением экспериментальных данных по газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

**Практическая значимость работы.** Разработанные модели процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя позволяют рассчитать состав генераторного газа, получаемый при воздушной и паровой газификации растительной биомассы в аппаратах кипящего слоя. Результаты работы могут быть использованы при проектировании газогенераторов кипящего слоя, работающих на растительной биомассе.

**Реализация работы.** Результаты исследования были использованы при оценке возможности перевода котельной предприятия ОАО «Лесплитинвест» (г. Приозерск) с технологии прямого сжигания на технологию газификации древесного сырья в кипящем слое, а также при выполнении научно-исследовательской работы “Production of bio-SNG with using biomass

gasification” на базе Лаппеенрантского технологического университета (Финляндия).

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается согласованностью расчетных и экспериментальных данных автора и других исследователей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, федеральных и региональных научно-технических конференциях: Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 2009, 2010 гг.); Международной молодежной научной конференции (Йошкар-Ола, 2010 г.), а также в рамках конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности "Эврика-2010" (г. Новочеркасск, 2010 г.); Всероссийского конкурса инновационных проектов и идей научной молодежи (г. Москва, 2011 г.); Молодежной программы «Инвестируя в будущее» в рамках выставки и конференции Russia Power (г. Москва, 2012, 2013 гг.); на семинарах кафедры «Атомная и тепловая энергетика» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» и ОАО «НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 8 статей (7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК), 1 учебное пособие, выпущен 1 отчет о НИР.

**Объем работы.** Диссертационная работа представлена на 165 страницах, содержит 32 таблицы, 55 рисунков.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, содержащей 81 наименование.

#### **Положения, выносимые на защиту**

- Модели процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

- Результаты расчетных и экспериментальных исследований по составу генераторного газа при воздушной и паровой газификации.

- Технологическая схема получения синтетического природного газа на основе процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы для промышленной теплоэнергетики, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** обобщены данные по ресурсам растительной биомассы и технологиям ее переработки. Основу ресурсной базы растительной биомассы для ее энергетического использования в России составляют лесоизбыточные регионы. Ежегодно при лесозаготовке менее 66 % объема древесной биомассы удаляется из леса для дальнейшей переработки. В традиционном

производственно-технологическом цикле только 28 % срубленного дерева становится пиломатериалами или другой продукцией («деловая древесина»), остальное составляют отходы, которые могут быть использованы в энергетических целях.

Существует достаточно большое количество способов переработки растительной биомассы, среди которых наибольшее распространение в мире получили прямое сжигание для выработки только тепловой энергии и газификация растительного сырья для получения генераторного газа, который потенциально может быть использован в энергетических целях.

Проведенный анализ аппаратов и технологий газификации растительной биомассы позволил сделать вывод, что для создания установок большой и средней мощности необходимо использовать технологию кипящего слоя.

**Вторая глава** посвящена анализу технологии и аппаратов газификации растительной биомассы в кипящем слое. Мировой опыт показывает, что наиболее востребованными являются газогенераторы кипящего слоя, сочетающие в себе возможность увеличения единичной мощности до 100 МВт и более, хорошие экологические показатели, а также качество получаемого генераторного газа.

**В третьей главе** рассмотрены разработанные модели процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

Моделирование процесса газификации растительной биомассы в кипящем слое сведено к определению состава и выхода генераторного газа.

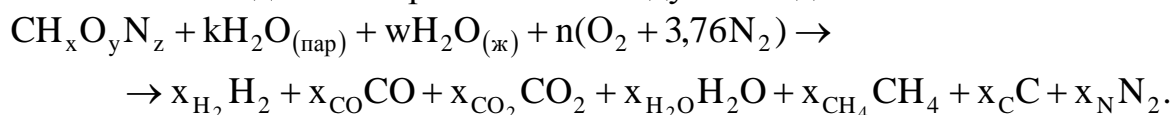
Исходными данными для разработанных моделей являлось: элементарный состав растительной биомассы, тип газифицирующего агента, температура и давление внутри газогенератора, мощность аппарата.

Для расчета состава генераторного газа разработаны следующие модели:

1. Модель термодинамического равновесия, включающая стехиометрическую и нестехиометрическую модели.
2. Модель, основанная на соотношении CO/CO<sub>2</sub> в генераторном газе.

**Стехиометрическая модель** основана на расчете констант равновесия химических реакций. Принцип создания модели следующий.

1. Записывается общая реакция газификации 1 моль растительной биомассы в k моль водяного пара и n моль воздуха в виде:



2. Составляется баланс массы, т. к. для законов, происходящих внутри газогенераторов, применимы законы сохранения массы и энергии:

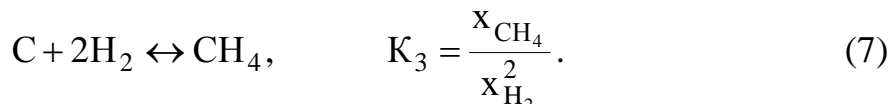
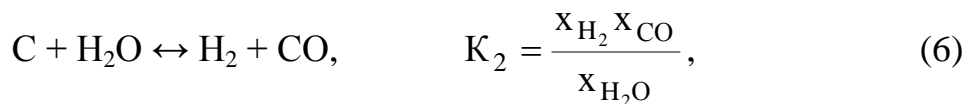
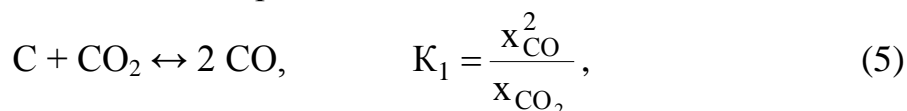
$$\text{C: } x_{\text{CO}} + x_{\text{CO}_2} + x_{\text{CH}_4} + x_{\text{C}} = 1, \quad (1)$$

$$\text{H: } 2x_{\text{H}_2} + 2x_{\text{H}_2\text{O}} + 4x_{\text{CH}_4} = x + 2k + 2w, \quad (2)$$

$$\text{O: } x_{\text{CO}} + 2x_{\text{CO}_2} + x_{\text{H}_2\text{O}} = y + k + w + 2n, \quad (3)$$

$$\text{N: } x_{\text{N}} = z + 7,52n. \quad (4)$$

3. Выделяются основные реакции газификации и находятся соответствующие им константы химического равновесия:



4. Решая систему уравнений (1)–(7), находим все неизвестные системы, определяем состав газа.

5. Составляется баланс энергии процесса газификации 1 кг топлива:

$$\begin{aligned} Q_{i,\text{биом}}^r + C_{\text{биом}} T_{\text{биом}} + Wh_{\text{пар}} + \alpha V^0 C'_{\text{возд}} T_{\text{возд}} + Q &= \\ &= V_{\text{ген.газ}} \left( Q_{i,\text{ген.газ}}^r + C'_{\text{ген.газ}} T_{\text{ген.газ}} \right) + Q_{\text{C}} + Q_{\text{потери}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В результате расчета находится  $Q$  – количество теплоты, которое необходимо подать в газогенератор для протекания процесса газификации. Эта теплота может быть введена за счет предварительного подогрева воздуха и/или инертного теплоносителя, а также за счет рециркуляции некоторого объема генераторного газа в реактор.

**Нестехиометрическая модель** основана на нахождении такого количественного равновесного состава генераторного газа, который отвечает минимуму его свободной энергии Гиббса. При определении минимума свободной энергии не требуется задания уравнений и констант химического равновесия реакций, поскольку значения свободной энергии зависят только от концентраций компонентов в фазах и масс фаз в системе. Единственной термодинамической величиной, необходимой для расчетов, является свободная энергия компонентов генераторного газа при температуре в газогенераторе.

Энергия Гиббса системы, состоящей из  $X$  ( $i = 1 \dots X$ ) компонентов, в условиях равновесия записывается в виде:

$$G = \sum_{i=1}^X x_i \Delta G_{T_{\text{гр}},i}^0 + \sum_{i=1}^X x_i RT_{\text{гр}} \ln \left( \frac{x_i}{\sum x_i} \right) \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для решения задач минимизации используем метод множителей Лагранжа, в соответствии с которым получим:

$$L = G - \sum_{j=1}^K \lambda_j \left( \sum_{i=1}^X a_{ij} x_i - A_j \right), \text{ кДж/моль}. \quad (10)$$

Приравниваем частные производные  $L$  по каждому компоненту к нулю и разделим получившееся выражение на  $RT$ :

$$\left( \frac{\partial L}{\partial x_i} \right) = 0. \quad (11)$$

Подставляя энергию Гиббса, определенную уравнением (9), в уравнение (11), получаем:

$$\left(\frac{\partial L}{\partial x_i}\right) = \frac{\Delta G_{T_{гр},i}^0}{RT_{гр}} + \sum_{i=1}^X \ln\left(\frac{x_i}{\sum x_i}\right) + \frac{1}{RT_{гр}} \sum_{j=1}^K \lambda_j \left(\sum_{i=1}^X a_{ij} x_i\right) = 0. \quad (12)$$

Для каждого из компонентов генераторного газа запишем:

$$\text{CH}_4: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{CH}_4}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{CH}_4}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{1}{RT_{гр}} \lambda_C + \frac{4}{RT_{гр}} \lambda_H = 0, \quad (13)$$

$$\text{CO}_2: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{CO}_2}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{CO}_2}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{1}{RT_{гр}} \lambda_C + \frac{2}{RT_{гр}} \lambda_O = 0, \quad (14)$$

$$\text{CO}: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{CO}}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{CO}}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{1}{RT_{гр}} \lambda_C + \frac{1}{RT_{гр}} \lambda_O = 0, \quad (15)$$

$$\text{H}_2: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{H}_2}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{H}_2}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{2}{RT_{гр}} \lambda_H = 0, \quad (16)$$

$$\text{H}_2\text{O}: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{H}_2\text{O}}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{H}_2\text{O}}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{2}{RT_{гр}} \lambda_H + \frac{1}{RT_{гр}} \lambda_O = 0, \quad (17)$$

$$\text{N}_2: \frac{\Delta G_{T_{гр},\text{N}_2}^0}{RT_{гр}} + \ln\left(\frac{x_{\text{N}_2}}{x_{\text{общ}}}\right) + \frac{2}{RT_{гр}} \lambda_N = 0, \quad (18)$$

где  $x_{\text{общ}} = \sum x_i$ .

Для нахождения состава газа уравнения (13)–(18) дополняются уравнениями балансов массы для элементов (1)–(4). Баланс энергии описывается уравнением (8).

**Модель, основанная на соотношении  $\text{CO}/\text{CO}_2$  в генераторном газе,** также позволяет рассчитать состав генераторного газа, когда механизм протекания химических реакций неизвестен. Помимо этого данная модель дает возможность учесть количество непрореагировавшего углерода топлива, что в других моделях сделать достаточно сложно.

Расчет основан на уравнениях балансов массы по каждому из элементов, а также на соотношении  $\text{CO}/\text{CO}_2$  в генераторном газе, которое было получено зарубежными специалистами при проведении ряда экспериментальных работ по газификации растительной биомассы в аппаратах кипящего слоя. Это соотношение описывается уравнением:

$$\beta = \frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2]} = 2400 \cdot e^{-\frac{6234}{T_{гр}}}. \quad (19)$$

Для нахождения состава генераторного газа была составлена следующая система уравнений, включающая балансы массы по каждому элементу и уравнение (19):



$$\begin{cases} n_C - (y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4}) \cdot m - x_C = 0, \\ n_H + 2 \cdot w + 2 \cdot k - (2 \cdot y_{H_2} + 2 \cdot y_{H_2O} + 4 \cdot y_{CH_4}) \cdot m = 0, \\ n_O + w + k - (y_{CO} + 2 \cdot y_{CO_2} + y_{H_2O}) \cdot m = 0, \\ y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4} + y_{H_2} + y_{H_2O} + \frac{n_{N_2}}{m} + \frac{n_S}{m} = 1, \\ \beta \cdot y_{CO_2} - y_{CO} = 0, \\ k = \left[ \left( 1 - \frac{W^r}{100} \right) \cdot W_{S/B} - \frac{W^r}{100} \right] \cdot \frac{1000}{M_{H_2O}}. \end{cases} \quad (20)$$

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, а также данные по сопоставлению результатов расчета по разработанным моделям газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя с полученными экспериментальными данными.

Эксперименты были проведены на базе Лаппеенрантского технологического университета (Финляндия). Принципиальная схема установки, на которой проводились исследования, приведена на рисунке 1.

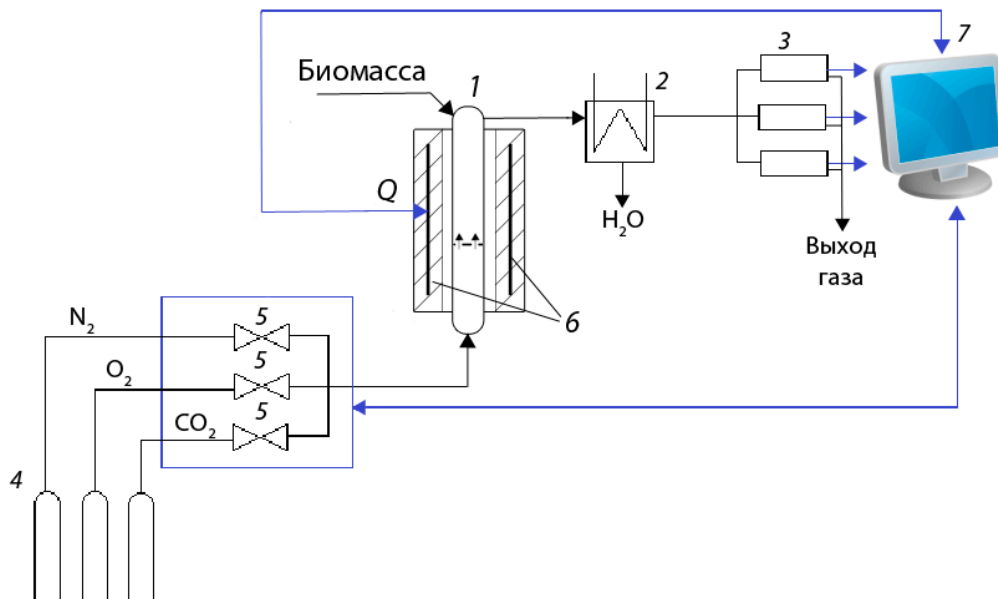


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки:

1 – газогенератор; 2 – система подготовки газа ТГАК–3; 3 – газоанализаторы (Geotech GA5000, Servomex, Thermo Scientific 60i); 4 – баллоны с кислородом, углекислым газом и азотом; 5 – расходомеры; 6 – нагреватель; 7 – персональный компьютер

В качестве топлива использовалась древесная щепа. Выбор именно древесной биомассы обусловлен наличием многотоннажных отходов, образующихся как во время лесозаготовки, так и на стадии деревообработки.

Размолотое на специальном станке до размеров 4...6 мм и подсушенное до влажности 12 % топливо подавалось в газогенератор 1. Конструкция газогенератора устроена так, что загрузка топлива осуществлялась сверху, а подача газифицирующего агента производилась в нижней точке аппарата под

колосниковую решетку. Колосниковая решетка выполнена из пористого материала, что способствовало равномерному распределению газифицирующего агента по поперечному сечению газогенератора.

Газификация топлива происходила в трубке диаметром 35 мм, имитирующей шахту газогенератора. Трубка изготовлена из термостойкого стекла, что позволяло нагревать аппарат до температуры 1100 °С. Снаружи трубка покрыта теплоизолирующим материалом, в который встроены пластины нагревателя 6. Выход газа производился из верхней части газогенератора. Отобранный газ охлаждался естественным образом при движении по газопроводу и далее попадал в систему подготовки газа TGAК-3 2, где происходила конденсация содержащейся в газе влаги. После этого свободный от смол и влаги, охлажденный до температуры 5 °С генераторный газ подавался в три параллельно расположенных газоанализатора 3: Geotech GA5000, Servomex, Thermo Scientific 60i. Данные, фиксируемые этими газоанализаторами, сводились в единую программу на ПК 7.

Для управления работой нагревателя и расходомерами на ПК была составлена программа в среде LabView, позволяющая задавать скорость нагрева газогенератора, требуемую конечную температуру и расход газифицирующего агента. В эту же программу сводились показания с газоанализаторов и строились диаграммы изменения состава газа и его температуры в режиме он-лайн.

В работе выполнен анализ достоверности разработанных моделей процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя с воздушным и паровым дутьем. Сравнивая данные проведенных расчетных исследований с экспериментальными, а также результатами, полученными другими исследователями, можно сделать вывод, что использование разработанной стехиометрической модели представляется наиболее целесообразным для моделирования процесса воздушной газификации. При моделировании паровой газификации рекомендуется использовать разработанную нестехиометрическую модель, а также модель, основанную на соотношении  $CO/CO_2$  в генераторном газе.

На рисунках 2–7 приведены сравнительные данные по зависимости состава генераторного газа и его теплоты сгорания от коэффициента избытка воздуха, полученные при исследовании процесса воздушной газификации древесной биомассы на лабораторном стенде и по результатам расчетов по разработанной стехиометрической модели.

Из представленных графиков видно, что максимальное расхождение данных эксперимента с результатами расчета воздушной газификации по стехиометрической модели составляет при  $\alpha = 0,25–0,4$ : 11 % для  $CH_4$ , 8 % для  $CO_2$  и 7 % для  $H_2$ . Исходя из этого, можно сделать вывод, что разработанная модель достаточно правдоподобно описывает процессы, происходящие при воздушной газификации древесной биомассы в газогенераторах кипящего слоя.

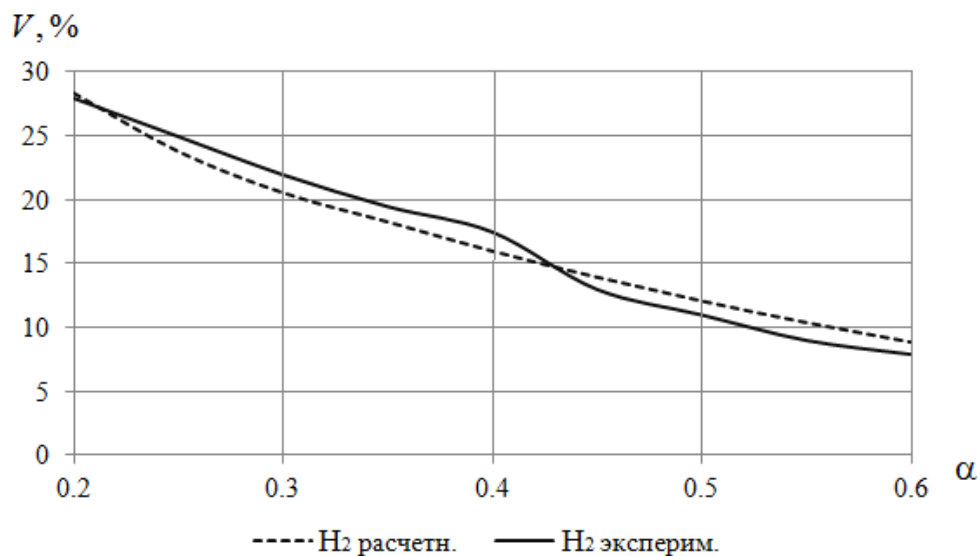


Рисунок 2 – Расчетные и экспериментальные данные для продуктов газификации (водород)

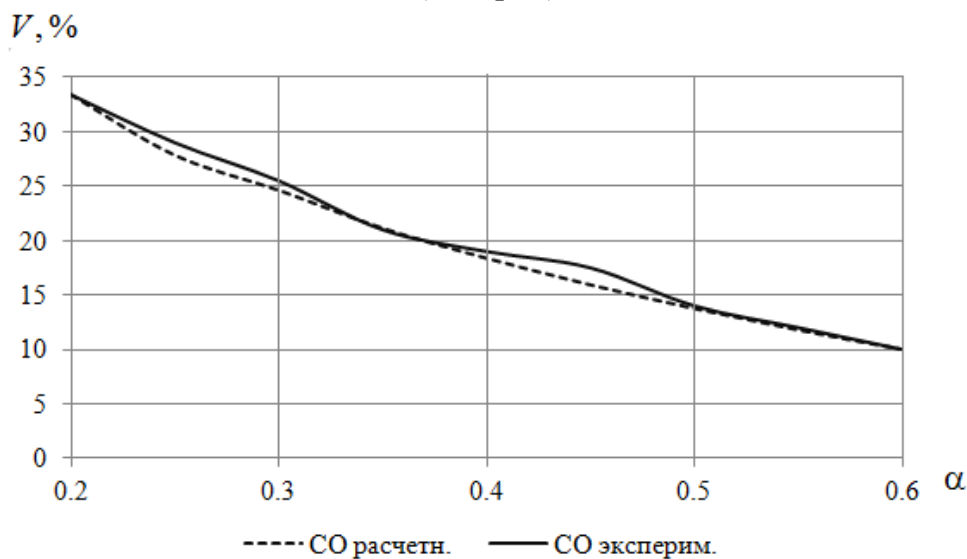


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментальные данные для продуктов газификации (оксид углерода)

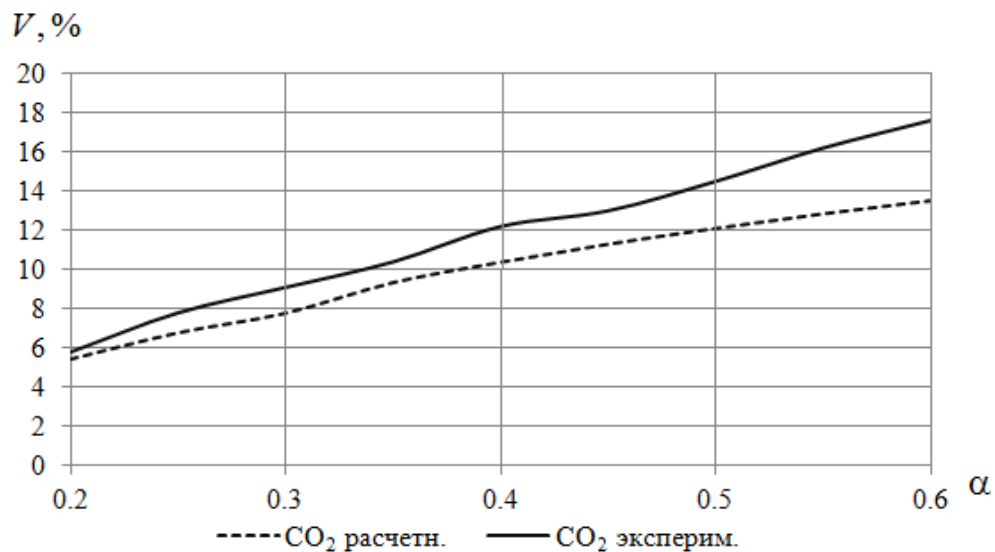


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные данные для продуктов газификации (диоксид углерода)

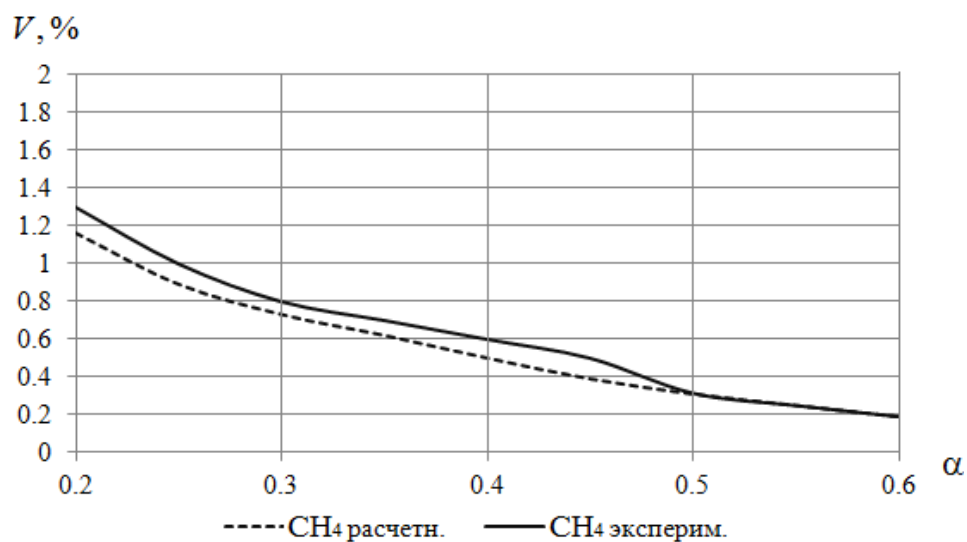


Рисунок 5 – Расчетные и экспериментальные данные для продуктов газификации (метан)

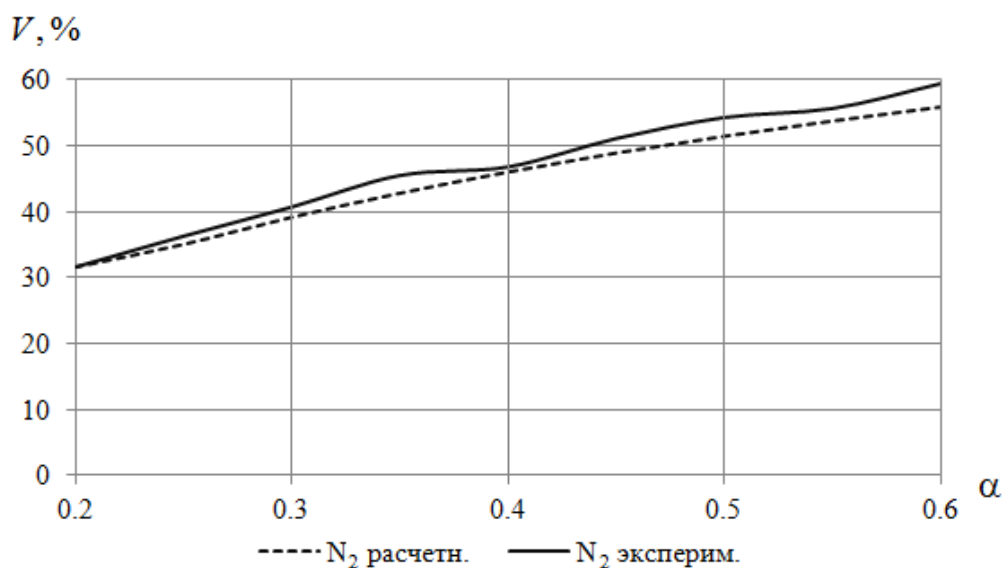


Рисунок 6 – Расчетные и экспериментальные данные для продуктов газификации (азот)

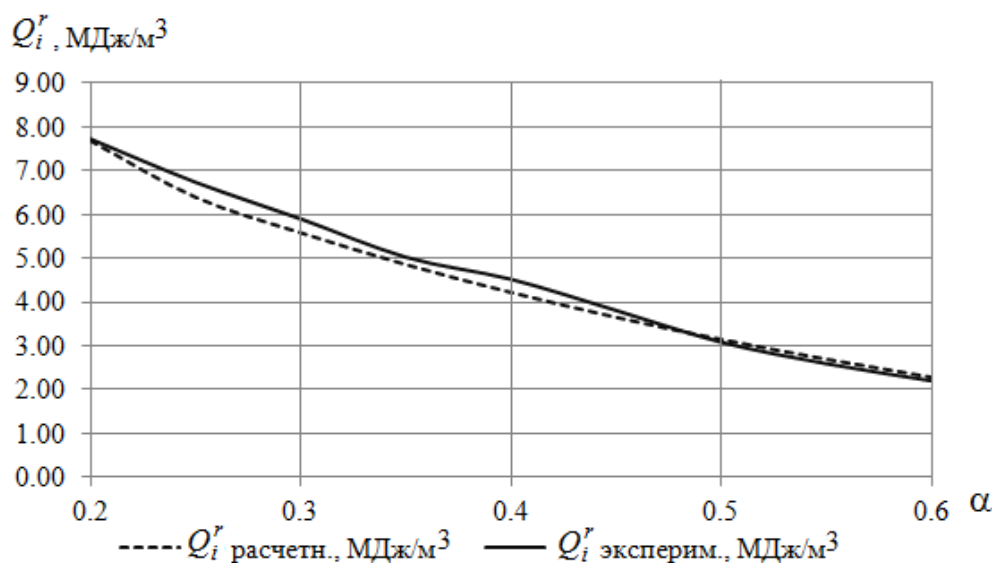


Рисунок 7 – Расчетные и экспериментальные данные по теплоте сгорания генераторного газа

Разработанная модель процесса воздушной газификации растительной биомассы в кипящем слое также позволяет рассчитывать состав генераторного газа при изменении влажности исходного топлива (рисунок 8). Результаты расчетов подтверждаются данными экспериментальных исследований, проведенных автором и другими исследователями при изменении влажности древесного топлива от 12 до 40 %.

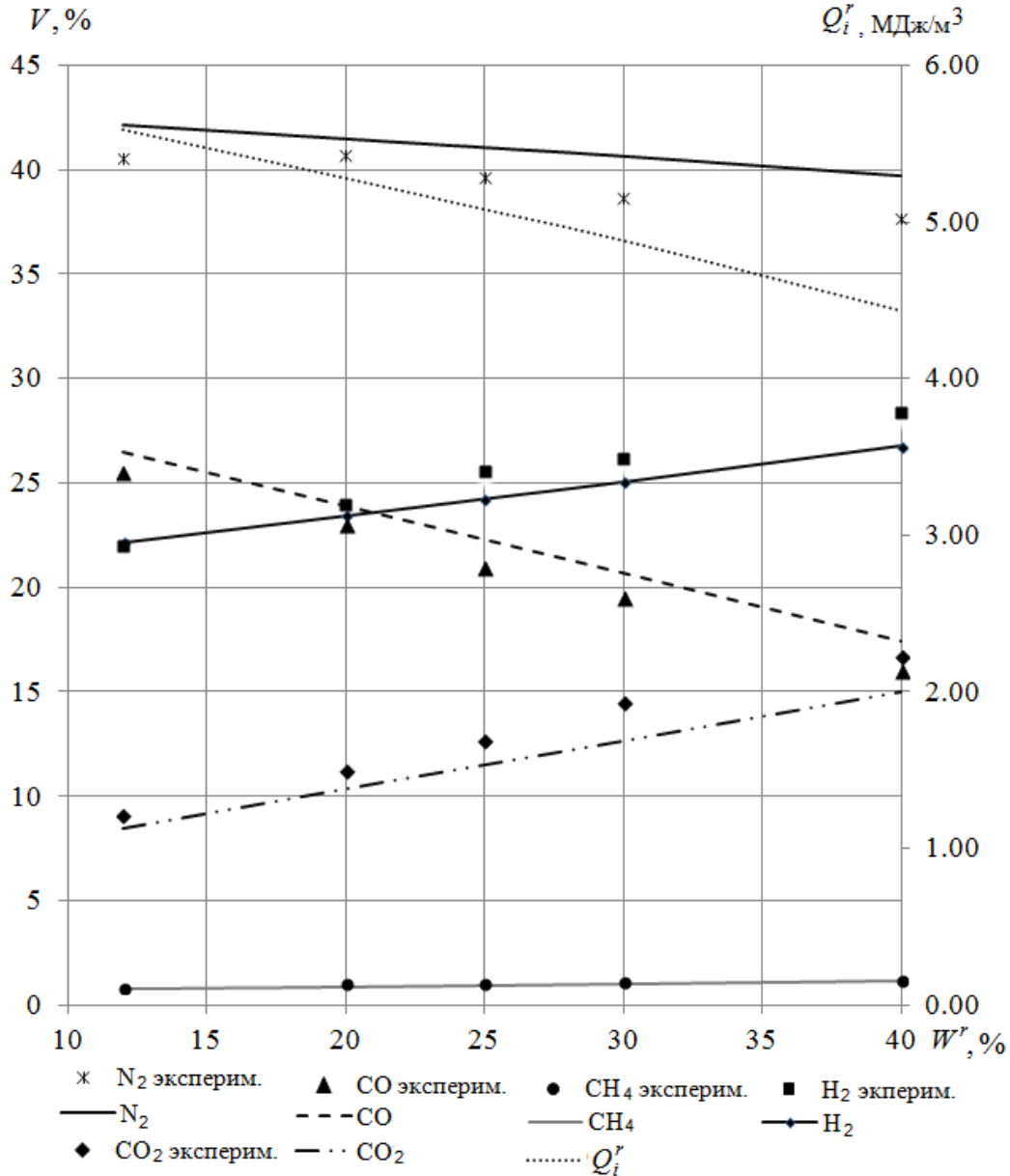


Рисунок 8 – Расчетные зависимости состава газа и его теплоты сгорания от влажности исходного топлива

Наибольшие расхождения результатов расчета с данными экспериментов при изменении влажности исходного топлива были отмечены для CO<sub>2</sub> (13 %), CH<sub>4</sub> (6,7 %), CO (5,8 %) при влажности 30 %; для CO<sub>2</sub> (10,4 %), CO (8,2 %), H<sub>2</sub> (5,8 %) при влажности 40 %.

Также были произведены расчеты паровой газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя. В отличие от воздушной газификации газификация паром позволяет получить генераторный газ, практически свободный от азота и имеющий достаточно высокую теплоту сгорания.

При расчете состава газа по разработанной нестехиометрической модели и модели, основанной на соотношении  $\text{CO}/\text{CO}_2$  в генераторном газе, при температуре в газогенераторе  $800\text{ }^\circ\text{C}$  и массовом расходе пара  $0,3\text{ кг/кг}$  были получены следующие результаты:

Компонент	Нестехиометрическая модель	Модель, учитывающая $\text{CO}/\text{CO}_2$
	V, %	
$\text{H}_2$	41,57	45,00
$\text{CO}$	24,54	25,00
$\text{CO}_2$	18,70	19,00
$\text{H}_2\text{O}$	2,92	0,30
$\text{CH}_4$	12,27	10,70

На рисунке 9 показана зависимость состава газа от расхода пара в газогенераторе, а на рисунке 10 – зависимость состава газа (при  $\alpha = 0,3$ ) от температуры в газогенераторе для модели, учитывающей соотношение  $\text{CO}/\text{CO}_2$  в газе.

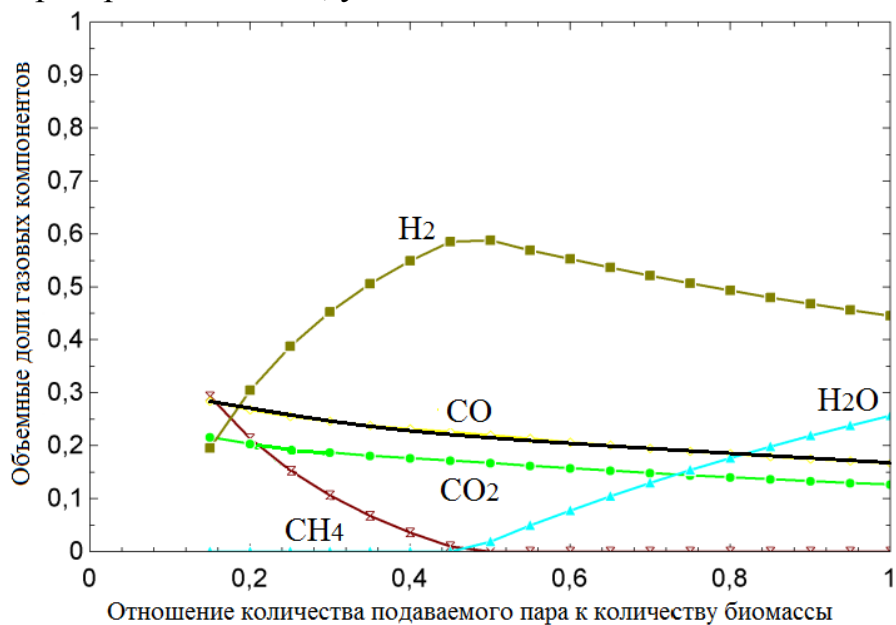


Рисунок 9 – Зависимость состава газа от количества подаваемого пара

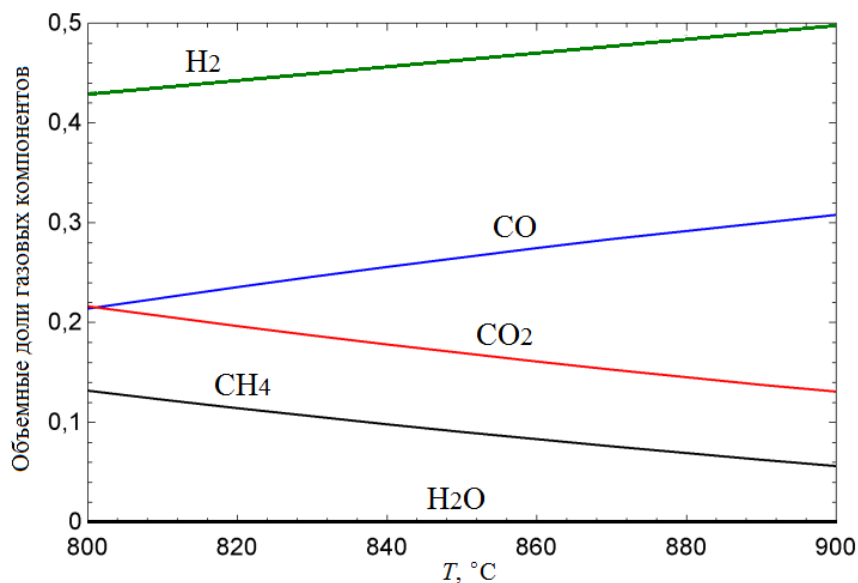


Рисунок 10 – Зависимость состава газа (при  $\alpha = 0,3$ ) от температуры в газогенераторе

Полученные зависимости, позволили определить диапазон соотношения пар/топливо (рисунок 11), при котором отношение водорода к оксиду углерода в газе больше 1,5. Такое требование предъявляется к генераторному газу, который используется для производства синтетических топлив.

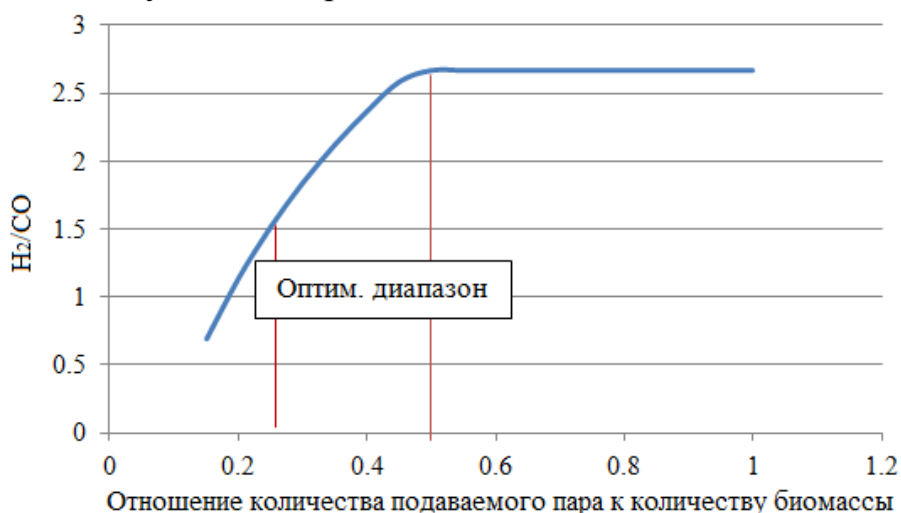


Рисунок 11 – Зависимость отношения  $H_2/CO$  в генераторном газе от количества подаваемого пара

В таблице 2 приведено сравнение состава генераторного газа, полученного в результате расчетов по разработанным моделям, с данными эксплуатации пилотной установки в г. Гёссинг (Австрия), при паровой газификации древесного топлива (соотношение пар/топливо = 0,3).

Таблица 2 – Сравнение состава газа, полученного при расчете по различным моделям, с данными эксплуатации пилотной установки

Компонент	Состав газа при 800 °С, %			Данные пилотной установки (Gussing)
	Стехиометрич. модель	Нестехиометрич. модель	Модель, учитывающая $CO/CO_2$	
$H_2$	47,93	41,57	45,00	35–45
$CO$	45,06	24,54	25,00	20–25
$CO_2$	2,17	18,70	19,00	15–25
$H_2O$	2,22	2,92	0,30	–
$CH_4$	2,62	12,27	10,70	8–12

На рисунке 12 приведено сравнение состава генераторного газа, полученного при расчете по различным моделям, в том числе разработанным автором, с данными экспериментов, проведенных зарубежными учеными.

Построенная диаграмма показывает, что разработанная нестехиометрическая модель и модель, основанная на соотношении  $CO/CO_2$  в газе, позволяют наиболее правдоподобно определить состав генераторного газа при паровой газификации, по крайней мере, при температурах 800...850 °С.

Решив задачу моделирования процесса газификации, необходимо определиться с сегментом теплоэнергетики, где применение аппаратов кипящего слоя будет наиболее экономически выгодным.

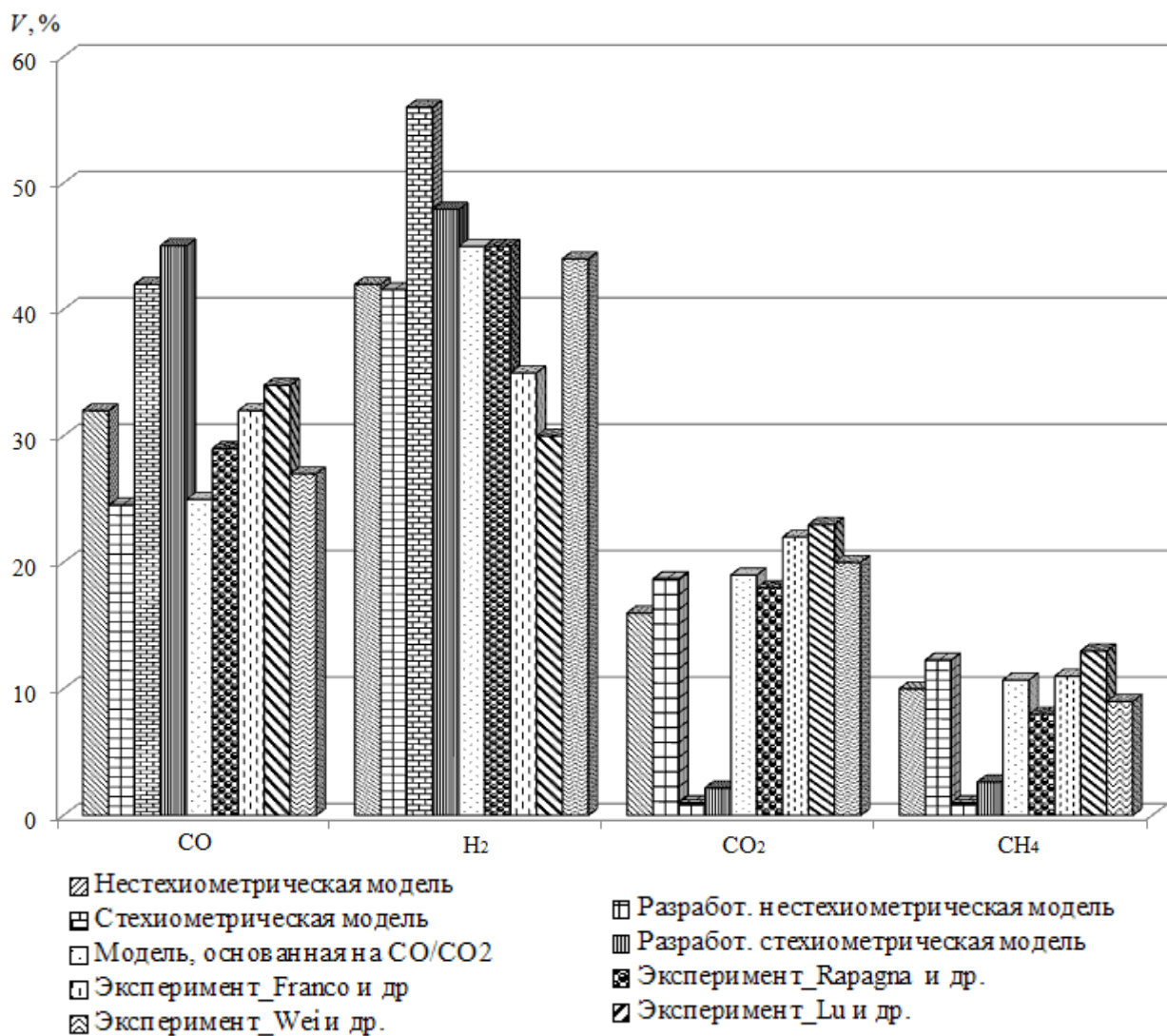


Рисунок 12 – Состав генераторного газа при паровой газификации, полученный в результате расчетов и в ходе экспериментов

В пятой главе представлен анализ современных технологий энергетического использования генераторного газа. Одним из наиболее перспективных направлений является использование генераторного газа после дополнительного его обогащения метаном. Принципиальная технологическая схема установки представлена на рисунке 13. За прототип была взята схема, разработанная австрийскими учеными. В предлагаемой схеме изменены система очистки генераторного газа и комплексная система его подготовки.

Принцип работы установки заключается в следующем. В камеру газификации двухступенчатого газогенератора подается растительная биомасса и инертный теплоноситель (кварцевый песок), а в качестве газифицирующего агента используется водяной пар. В результате процесса паровой газификации образуется генераторный газ достаточно высокой теплоты сгорания, который выходит из газогенератора в верхней его части. Непрореагировавший углерод топлива вместе с инертным теплоносителем поступают в камеру сгорания, куда одновременно подается воздух в избытке для того, чтобы обеспечить полное сгорание непрореагировавшего углерода топлива. Таким



образом происходит нагрев теплоносителя, который затем возвращается в зону газификации.

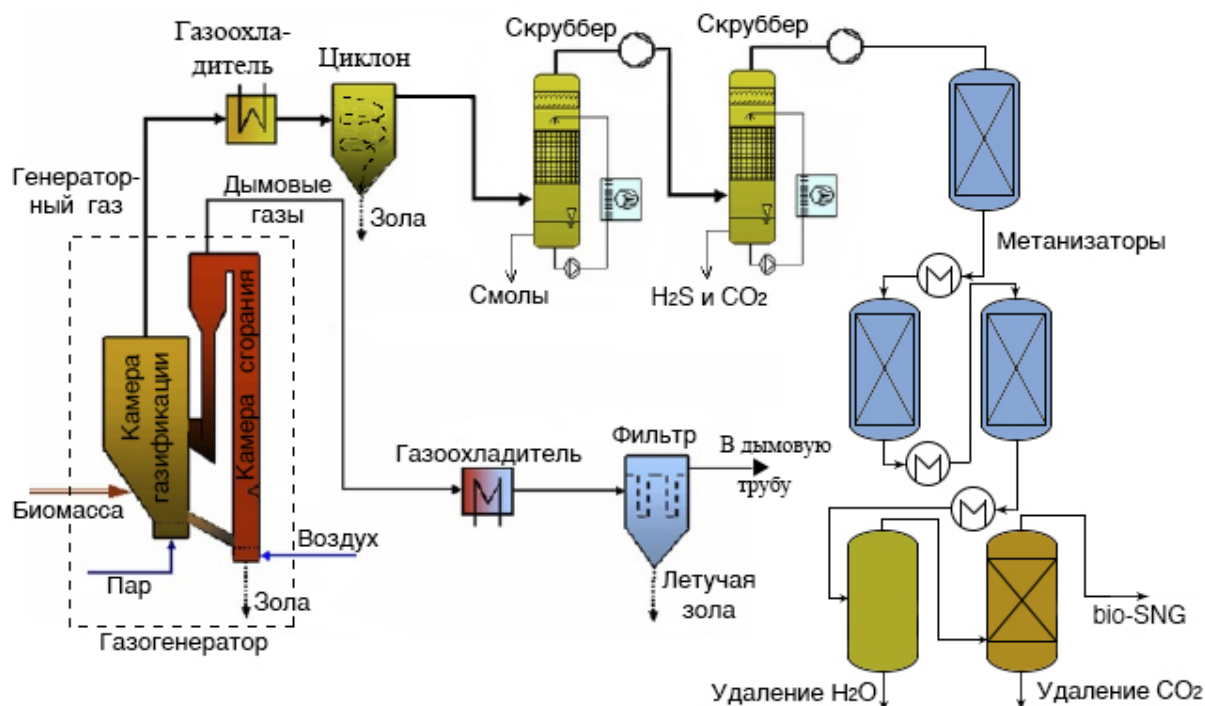


Рисунок 13 – Принципиальная схема установки получения синтетического природного газа

Дымовые газы, выходя из камеры сгорания, охлаждаются в системе охлаждения дымовых газов, очищаются от твердых частиц в электрофильтре и выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

Генераторный газ проходит систему охлаждения, попадает в скруббер для очистки газа от смол, циклон, где происходит удаление твердых частиц, систему очистки от  $H_2S$  и  $CO_2$  и далее поступает в систему подготовки генераторного газа. Комплексная система подготовки газа состоит из трех последовательно расположенных реакторов (метанизаторов), в которых протекают реакции синтеза метана, системы охлаждения газа, удаления содержащихся в нем водяного пара и диоксида углерода.

При расчете технологической схемы были использованы данные расчетов по стехиометрической модели, представленные в таблице 2. В таблице 3 приведены данные расчета состава газа после каждой ступени подготовки.

Качество газообразного топлива определяется по числу Воббе. Это число характеризует постоянство теплового потока, получаемого при сжигании газа. Газы с одинаковым числом Воббе при равном давлении истечения обычно могут использоваться один вместо другого без замены горелки или форсунки. Число Воббе для синтетического газа определяем по формуле:

$$W_{OH} = \frac{Q_{i, \text{синт. газ}}^s}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{ген. газ}}}{\rho_{\text{возд}}}}} = \frac{37,25}{\sqrt{0,813}} = 46,68 \text{ МДж/м}^3. \quad (21)$$

Таблица 3 – Состав генераторного газа на этапах технологического цикла

Компонент	Исходный газ	Газ после 1-го реактора	Газ после 2-го реактора	Газ после 3-го реактора	Газ после осушки	Газ после удаления CO <sub>2</sub>
	V, %					
CH <sub>4</sub>	13,03	24,19	31,07	40,82	52,58	92,41
H <sub>2</sub> O	1,41	8,93	14,66	22,37	0,00	0,00
CO <sub>2</sub>	19,71	23,79	30,72	34,49	44,53	2,34
CO	24,17	10,65	5,68	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub>	41,68	32,74	17,87	2,32	2,98	5,24

В таблице 4 приведено сравнение состава природного и синтетического газов, а также газа, получаемого при смешении природного газа и полученного синтетического в различных пропорциях. В таблице 4 значком «\*» отмечен состав газа, получаемый в том случае, когда к природному газу подмешивается газ, не очищенный от диоксида углерода, т. е. вводится допущение, что система удаления CO<sub>2</sub> из генераторного газа вышла из строя.

Таблица 4 – Сравнение состава природного газа, синтетического газа, а также их смесей

Компоненты и параметры	Природный газ (ПГ) в газопроводе		Генераторный газ (ГГ)	Смесь газов		
	Минимально допустимый состав газа, %	Лучший состав, %		95 % ПГ (худш.); 5 % ГГ	95 % ПГ (лучш.); 5 % ГГ	95 % ПГ (лучш.); 5 % ГГ*
CH <sub>4</sub>	91,00	97,90	92,41	91,07	97,63	95,63
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5,25	0,1	0	4,99	0,10	0,1
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,77	0,8	0	0,73	0,76	0,76
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,01	0,2	0	0,01	0,19	0,19
CO <sub>2</sub>	2,16	0,1	2,34	2,17	0,25	0,15
H <sub>2</sub>	0	0	5,24	0,25	0,21	2,32
N <sub>2</sub>	0,82	0,1	0,1	0,78	0,10	0,1
H <sub>2</sub> O	0,62	0,9	0	0,60	0,86	0,86
$\rho_{\text{ген.газ}}$ , кг/м <sup>3</sup>	0,782	0,733	0,714	0,779	0,732	0,760
$Q_i^s$ , МДж/м <sup>3</sup>	39,81	40,22	37,25	39,75	40,07	39,26
$W_{OH}$ , МДж/м <sup>3</sup>	48,91	51,01	47,88	48,94	50,86	48,94
$\Delta W_{OH}$ , %						
- худш.	0	4	2	0	4	0
- лучш.	4	0	6	4	0	4

В работе также выполнена оценка общих капитальных вложений в строительство подобной станции мощностью 1 МВт (по топливу), 0,275 МВт (по синтетическому газу), а также проведен расчет себестоимости производимого синтетического природного газа.

Капитальные вложения в строительство станции мощность 0,275 МВт (по газу) оцениваются в 41,6 млн. рублей. При расчете себестоимости производимого газа учитывалось, что в качестве топлива используются многотон-

нажные отходы деревообрабатывающих предприятий, поэтому топливная составляющая равняется нулю. Себестоимость производимого газа по предварительным расчетам будет составлять:

$$C_{\text{синт.газ}} = 24\,534,8 \text{ руб./1000 м}^3.$$

При увеличении единичной мощности установки до 100 МВт, себестоимость вырабатываемого газа снизится до  $C_{\text{синт.газ}} = 13\,028,8 \text{ руб./1000 м}^3$ .

По состоянию на 1 января 2013 года розничная цена природного газа для Санкт-Петербурга равнялась 4 375,04 руб./1000 м<sup>3</sup>. Однако, по оценкам специалистов экспертной группы Citi к 2020 году средняя цена на российский природный газ будет составлять около 9 600 руб./1000 м<sup>3</sup>.

В работе сделана оценка рентабельности предлагаемой технологии. Производимый синтетический природный газ становится конкурентоспособным с природным газом при увеличении единичной мощности газогенераторов до 100 МВт и более. Кроме этого, снижение стоимости синтетического природного газа связано с увеличением КПД технологического цикла, повышении производительности метанизаторов, а также введении дополнительной платы за выбросы CO<sub>2</sub> при использовании «традиционных» топлив.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенная оценка ресурсной базы растительной биомассы в России позволяет сделать вывод о значительных не востребуемых ресурсах растительной биомассы и целесообразности, в связи с этим, разработки и внедрения установок средней и большой мощности, которые реализуют технологию газификации в кипящем слое и способны заместить значительную долю энергетических мощностей в регионах децентрализованного энерго- и газоснабжения.

2. Разработаны модели воздушной и паровой газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя: стехиометрическая модель, основанная на расчете констант равновесия химических реакций, пригодная для расчета состава газа при воздушной газификации; нестехиометрическая модель, в основе которой лежит метод минимизации энергии Гиббса, и модель, основанная на соотношении CO/CO<sub>2</sub> в генераторном газе, которые дают наиболее достоверные данные по составу газа при паровой газификации.

3. Получены экспериментальные данные по зависимости состава генераторного газа от коэффициента избытка воздуха при воздушной газификации растительной биомассы в газогенераторе кипящего слоя. Максимальное расхождение данных эксперимента с результатами расчета воздушной газификации по стехиометрической модели составляет при  $\alpha = 0,25-0,4$ : 11 % для CH<sub>4</sub>, 8 % для CO<sub>2</sub> и 7 % для H<sub>2</sub>.

4. В результате расчета состава генераторного газа при паровой газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя по разработанным нестехиометрической модели и модели, основанной на соотношении CO/CO<sub>2</sub> в газе, получено, что объемные концентрации газовых компо-

нент соответствуют диапазонам их значений, которые были получены зарубежными учеными, в частности, австрийскими.

5. Рассмотрены основные пути внедрения газогенераторных технологий в промышленную энергетику: использование генераторного газа в камере сгорания ГТУ парогазовой установки (с максимальным КПД цикла 42,1 %) и производство высококалорийного синтетического газа, который потенциально может заменить природный газ в парогазовом цикле.

6. Разработана технологическая схема получения синтетического природного газа на основе процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя. Производимый синтетический газ имеет теплоту сгорания 37,25 МДж/м<sup>3</sup>. Экономическая оценка предложенной технологии показывает ее конкурентоспособность при увеличении единичной мощности газогенератора до 100 МВт и более.

7. Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с созданием опытно-промышленных образцов газогенераторов кипящего слоя на основе разработанных моделей процесса газификации с целью внедрения их в промышленную теплоэнергетику.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Алешина А.С. Выбор тепловой схемы и оборудования газогенераторного энергетического модуля / В.В. Сергеев, А.С. Алешина // Труды Академэнерго. – 2010 – № 2. – С. 48–56.

2. Алешина А.С. Использование твердых бытовых отходов в качестве топлива / А.С. Алешина, В.В. Сергеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010 – № 4. – С. 91–96.

3. Алешина А.С. Перспективные направления внедрения парогазовых технологий в энергетику России / А.С. Алешина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010 – № 5. – С. 71–72.

4. Алешина А.С. Разработка технических предложений по созданию газогенераторной паротурбинной электростанции / В.М. Боровков, В.В. Сергеев, А.С. Алешина // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 50–53.

5. Алешина А.С. Газогенераторная парогазовая установка с высоконапорным котлом-утилизатором / В.В. Сергеев, А.С. Алешина // Теплоэнергетика. – 2011 – № 3. – С. 68–70.

6. Алешина А.С. Тепловые схемы газогенераторных электростанций на растительной биомассе / А.С. Алешина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 2. – С. 99–104.

7. Алешина А.С. Моделирование процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя / С.А. Иванов, А.С. Алешина // Вестник ЗабГУ. – 2013. – № 3. – С. 78–89.

8. Алешина А.С. Современные технологии энергетического использования генераторного газа [Электронный ресурс] / А.С. Алешина, В. В. Сергеев // Новое в российской электроэнергетике. – 2013. – № 5. – Режим доступа: <http://www.energo-press.info/nre/body/arch/2013/ann2013/5/index.php>.

9. Алешина А.С. Газификация твердого топлива : учеб. пособие / А.С. Алешина, В.В. Сергеев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 200 с.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$x, y, z$  – отношение количества атомов водорода, кислорода и азота в топливе на каждый атом углерода топлива, соответственно;  $w$  – количество топливной влаги, моль;  $x_i$  – количество моль  $i$ -го компонента в генераторном газе, моль;  $y_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента в генераторном газе;  $x_C$  – непрореагировавший углерод топлива;  $k, n$  – количество подаваемого для газификации пара и воздуха соответственно, моль;  $m$  – сумма количества вещества всех компонентов в газе, моль;  $M_{H_2O}$  – молярная масса водяного пара, г/моль;  $K_i$  – константа равновесия  $i$ -ой химической реакции;  $W_{S/B}$  – расход пара на 1 кг биомассы, кг/кг;  $n_i$  – количество моль компонента в исходном топливе;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности;  $V^0$  – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $W^r$  – влажность исходного топлива, %;  $W$  – расход пара для газификации 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $\Delta G_{T_{гг},i}^0$  – энергия Гиббса для  $i$ -го компонента генераторного газа при температуре  $T_{гг}$ , кДж/моль;  $T_{гг}$  – температура в газогенераторе, К;  $L$  – функция Лагранжа;  $\lambda_j$  – множитель Лагранжа для  $j$ -го элемента;  $a_{ij}$  – количество атомов  $j$ -го элемента в 1 моле  $i$ -го компонента;  $A_j$  – общее количество атомов  $j$ -го элемента, поданных в газогенератор с продуктами реакции;  $i = 1 \dots X$ ;  $j = 1 \dots K$ ;  $Q_{i,биом}^r$  – низшая теплота сгорания растительной биомассы, кДж/кг;  $Q_{i,ген.газ}^r$  – низшая теплота сгорания генераторного газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $h_{пар}$  – энтальпия подаваемого пара, кДж/м<sup>3</sup>;  $C'_{возд}$ ,  $C'_{ген.газ}$  – объемная теплоемкость воздуха и генераторного газа при температуре  $T_{возд}$  и  $T_{ген.газ}$ , соответственно; кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_{возд}$  – температура вдуваемого воздуха, К;  $T_{ген.газ}$  – температура газа на выходе из газогенератора, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $V_{ген.газ}$  – выход генераторного газа при газификации 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $C_{биом} T_{биом}$  – физическое тепло топлива (если топливо перед подачей в газогенератор подогревается), кДж/кг;  $Q_C$  – теплота непрореагировавшего углерода топлива, кДж/кг;  $Q_{потери}$  – суммарные потери теплоты на 1 кг поданного топлива через стенки газогенератора, с золой, шлаком и уносом, кДж/кг;  $Q$  – количество теплоты, которое необходимо подать в газогенератор для газификации 1 кг топлива, кДж/кг;  $Q_{i,синт.газ}^s$  – высшая теплота сгорания синтетического газа, МДж/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ген.газ}$ ,  $\rho_{возд}$  – плотность генераторного газа и воздуха при заданных условиях, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $W_{ОН}$  – число Воббе, МДж/м<sup>3</sup>;  $C_{синт.газ}$  – себестоимость синтетического газа, руб./1000 м<sup>3</sup>.