

На правах рукописи

Прокопьев Сергей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАОКСИПИРОЛИЗА
ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОНЕФТИ И
ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ**

05.21.03 — Технология и оборудование химической переработки
биомассы дерева; химия древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена на кафедре технологии лесохимических продуктов и биологически активных веществ Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии им. С.М.Кирова

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент **Киповский А.Я.**

Официальные оппоненты: доктор химических наук,
профессор **Пономарев Д.А.**
кандидат технических наук,
доцент **Цыганов Е.А.**

Ведущая организация: Архангельский государственный технический университет, 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17.

Защита диссертации состоится 24.01.08 на заседании диссертационного совета Д212.220.01. при Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии им. С.М.Кирова (194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д.5)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЛТА

Автореферат разослан « 18 » декабря 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Калинин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Стоимость ископаемых топлив на рынке с каждым годом постоянно увеличивается. В условиях глобального роста цен на углеводородное сырье ведется активный поиск альтернативных источников энергоносителей. В сложившейся ситуации использование биомассы возобновляемого сырья для получения энергии становится экономически выгодным.

Сравнительная энергетическая плотность топлив из древесной биомассы и традиционных из нефтяного сырья, ГДж/м³: опилки – 2,3; древесная щепа – 7,2; пеллеты – 11,7; древесный уголь – 9,0; древесноугольные брикеты – 19,5; метанол – 17,7; этанол – 22,4; биомасла Ensyn (Канада) – 20,0; бионефть Dynamotive (Канада) – 20,4; бионефть (СПб ГЛТА) – 30,5; биомасла (СПбГЛТА) – 32,3; дизельное топливо – 36,0; мазут – 38,4.

Учитывая перспективность развития биоэнергетики, во всех промышленно-развитых странах интенсивно прорабатываются направления термической переработки древесной биомассы, такие как газификация, ожижение, быстрый пиролиз биомассы (ультрапиролиз), включая специальные энергетические лесопосадки (ива, тополь, эвкалипт).

Цель и задачи исследования.

Цель работы – разработать оптимальную технологию ультраоксипиролиза древесной биомассы для получения бионефти и древесного угля как сырья для древесноугольных брикетов.

Задачи исследования:

1. Провести сравнение отечественных и зарубежных технологий ультрапиролиза, рассмотреть особенности технологий быстрого пиролиза отходов древесного сырья
2. Изучить влияние температурно-временных факторов на выход и состав получаемых продуктов ультрапиролиза.
3. Рассмотреть существующие математические методы расчета температурных полей ультрапиролиза в противотоке сырья и газового теплоносителя. На основе существующей программы “POLY.TERM” разработать новую программу расчета температурных полей “POLY.TERM 2”, позволяющую получать корректные значения распределения температур в процессе ультрапиролиза при противотоке

газового теплоносителя и древесного сырья в плотном слое.

4. Экспериментально апробировать процесс скоростного пиролиза, получить экспериментальные данные и сравнить с данными, полученными расчетным путем для последующего проектирования пилотного модуля ультрапиролиза.

5. Разработать технологию ультраоксипиролиза для получения бионефти и древесного угля и оборудование транспортабельного модуля ультраоксипиролиза мощностью 1 т/час по сырью.

Научная новизна.

1. Разработана программа “POLY.TERM 2” для расчета температурных полей в процессе ультрапиролиза измельченной древесной биомассы с применением внутреннего нагрева газовым теплоносителем.

2. Рассчитаны температурные поля при интенсификации процесса пиролиза и скоростях газового теплоносителя выше скорости витания частицы.

3. Установлено теоретически и экспериментально подтверждено наличие критерия жесткости в области температур теплоносителя 600-900 °С.

4. Установлено и доказано влияние скорости нагрева на выход нелетучего остатка и определяющее значение критерия жесткости на распределение компонентов летучей фазы пиролиза.

Практическая значимость.

Разработанная технология позволяет достичь высокой экономической эффективности при переработке измельченного древесного сырья в альтернативное топливо и является основой для промышленного внедрения.

На защиту выносятся:

- Сравнительная характеристика отечественных и зарубежных промышленных технологий ультрапиролиза древесного сырья;
- Положения и допущения, сделанные при разработке программы “POLY.TERM 2”;
- Основные зависимости распределения продуктов пиролиза при интенсификации процесса;
- Основные принципы технологии ультрапиролиза в формованном слое при противотоке сырья и теплоносителя.

Апробация работы.

Материалы исследования докладывались на:

- Ежегодной научно-технической конференции СПбГЛТА 2005 г.

- Ежегодной научной конференции молодых ученых СПбГЛТА 2005г.
- Международной конференции ”Актуальные проблемы биотоплива и биоэнергетики“. Санкт-Петербург, 2006г,
- Ежегодной научной конференции молодых ученых СПбГЛТА 2006г.
- Ежегодной научно-технической конференции СПбГЛТА 2007 г.
- Международной конференции ”Актуальные проблемы биотоплива и биоэнергетики“. Санкт-Петербург, 2007г,

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных трудов

Объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов и списка использованной литературы, включающего 209 наименований.

Работа изложена на 205 стр., в том числе 2 приложения на 20 стр. и включает 55 рисунков, 27 таблиц.

Краткое содержание работы

В **введении** рассмотрено современное состояние биоэнергетики в области термической переработки биомассы древесины.

Большинство мировых экспертов склоняются к производству древесных топливных гранул (пеллет), как альтернативе традиционным энергоносителям.

При ближайшем сравнении основных характеристик производства пеллет и бионефти (табл.1) видны очевидные преимущества последней.

Табл.1 Сравнительная характеристика пеллет и бионефти.

Показатель	Пеллеты	Бионефть СПбГЛТА
Энергетическая ценность, ГДж/м ³	11,7	30,5
Плотность продукта, кг/м ³	650	1200
Цена 1 т продукции, €	≈200	≈300

Бионефть – наиболее перспективный вид топлива из возобновляемого сырья, т.к. обладает высокой энергетической плотностью, в продуктах её сгорания фактически отсутствуют оксиды серы, а количество образующихся оксидов азота в половину меньше по сравнению с ископаемым топливом. Особое значение данного продукта проявляется при реализации Киотского Протокола о сокращении парниковых выбросов.

Бионефть обладает важным качеством – текучестью, это дает неоспоримые преимущества при её транспортировании, хранении и сжигании с регулируемым количеством кислорода.

Таким образом, перспективность развития биоэнергетики, экономические и экологические аспекты подталкивают к разработке промышленно приемлемых способов переработки древесной биомассы в энергоносители.

В главе 1 представлены современные теоретические основы пиролиза биомассы древесины. Рассмотрено влияние сырьевых и режимных факторов на выход и качество продуктов пиролиза. Проанализировано влияние влажности на продолжительность процесса, а также возможность осуществления замкнутого теплового баланса пиролиза за счет использования экзотермического тепла и тепла от сжигания собственных неконденсирующихся газов. В целом из приведенных основ следует, что повышение выхода бионефти возможно за счет реакций рекомбинации арильных соединений с низкомолекулярными соединениями.

В главе 2 представлены некоторые особенности технологии пиролиза отходов древесного сырья: пиролиз с внешним нагревом, пиролиз с газовым теплоносителем, пиролиз с твердым теплоносителем, пиролиз в кипящем слое, высокочастотный пиролиз, плазмохимический пиролиз, электротермический пиролиз, термоокислительный пиролиз, абляционный пиролиз, пиролиз в формованном слое, термокаталитический пиролиз. Из особенностей приведенных технологий пиролиза древесной биомассы наиболее перспективными являются технологии кипящего слоя, абляционного пиролиза и формованного слоя с внутренним нагревом газовым теплоносителем.

В главе 3 введена классификация промышленного отечественного и зарубежного оборудования ультрапиролиза измельченного древесного сырья по 8 типам технологий, для чего выполнена их детальная характеристика.

1 Реторты шахтного типа

Реторта Стаффорда, СИФИК, Ламбиотта, Карбохима, Славянского, Экофор, печь-газогенератор ЛТА. Данные технологии имеют схожий принцип проведения процесса пиролиза. Все реторты вертикальные, непрерывнодействующие, представляют вид шахт.

2. Реторты барабанного типа

Орегонская, ВНИИТУСа, Р-1000. У представителей данного типа основным аппаратом является горизонтальная, имеющая небольшой наклон в сторону выгрузки, вращающаяся барабанная печь для пиролиза измельченной древесины.

3. Шнековые реторты

Реторта Зимана, Томсона. Отличием данных технологий от других является наличие шнека в реторте, благодаря которому осуществляется

регулируемая подача сырья, его продвижение по реторте и выгрузка получаемого продукта

4. Реторта вакуум пиролиза

Реактор пиролиза биомассы Pyrovac, Pyrocycling™

5. Реторты быстрого пиролиза в слое уноса.

Реторта в потоке уноса Egemin, University of Waterloo

6. Реторты абляционного пиролиза.

University of Twente, ВВС. Теплопередача происходит с помощью прямого контакта твердых частиц биомассы с нагретой теплопередающей поверхностью реактора.

7. Реторты кипящего слоя.

Реторта взвешенного слоя Фефилова, Установки Ensyn ENEL Bastardo, Ensyn RTP, Установки Dynamotive RTI. В данных технологиях процесс пиролиза происходит во взвешенном состоянии, следует отметить интенсивный теплообмен, скорость процесса. Недостатками является низкая концентрация жидких продуктов пиролиза в отработанном газовом теплоносителе и затруднения при отделении угольной пыли от летучих продуктов пиролиза.

8. Реторты формованного слоя.

Реторта электротермического, термоокислительного пиролиза, реторта Верхотурского КЭЗа, в которой заложен принцип противотока формованного слоя и газового теплоносителя с температурой до 1000⁰С. Этот способ характеризуется следующими положительными особенностями:

- скорость продвижения сырья по сечению и длине реактора строго постоянна, что позволяет получить товарный продукт однородного качества;

- плотный слой позволяет значительно повысить скорость теплоносителя и, следовательно, существенно ускорить тепло- и массообмен в реакционной зоне;

- плотный слой препятствует механическому уносу частиц, позволяет улучшить степень полезного использования тепла и резко увеличить удельную производительность аппарата.

- увеличивается коэффициент заполнения реторты, что способствует уменьшению габаритов и соответственно снижению массоёмкости установки.

В главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований.

На первом этапе экспериментальной работы были проведены предварительные опыты для получения данных по изучению влияния скорости нагрева на выход конечных продуктов при пиролизе древесины.

Опыты проводились в лабораторных условиях на пилотной установке

(рис.1) с фиксированной конечной температурой нагрева 600°C . Загрузка в реторту составляла 1 кг.

В первой серии опытов древесина подвергалась постепенному медленному нагреву. Это имеет место и в существующих аппаратах пиролиза древесины.

Вторая серия опытов была проведена на той же установке только в условиях быстрого повышения температуры. Если в опытах с медленным нагревом реторта с древесиной загружалась в холодную муфельную печь и включался нагрев, то в случае скоростного пиролиза печь предварительно нагревалась до температуры 800°C , а реторта с древесиной подогревалась до $110 - 120^{\circ}\text{C}$ и только после этого помещалась в разогретую муфельную печь. В процессе пиролиза через минутный интервал регистрировались: температуры муфеля, реторты, парогазов, объем конденсата и отстойной смолы, неконденсирующихся газов и давление.

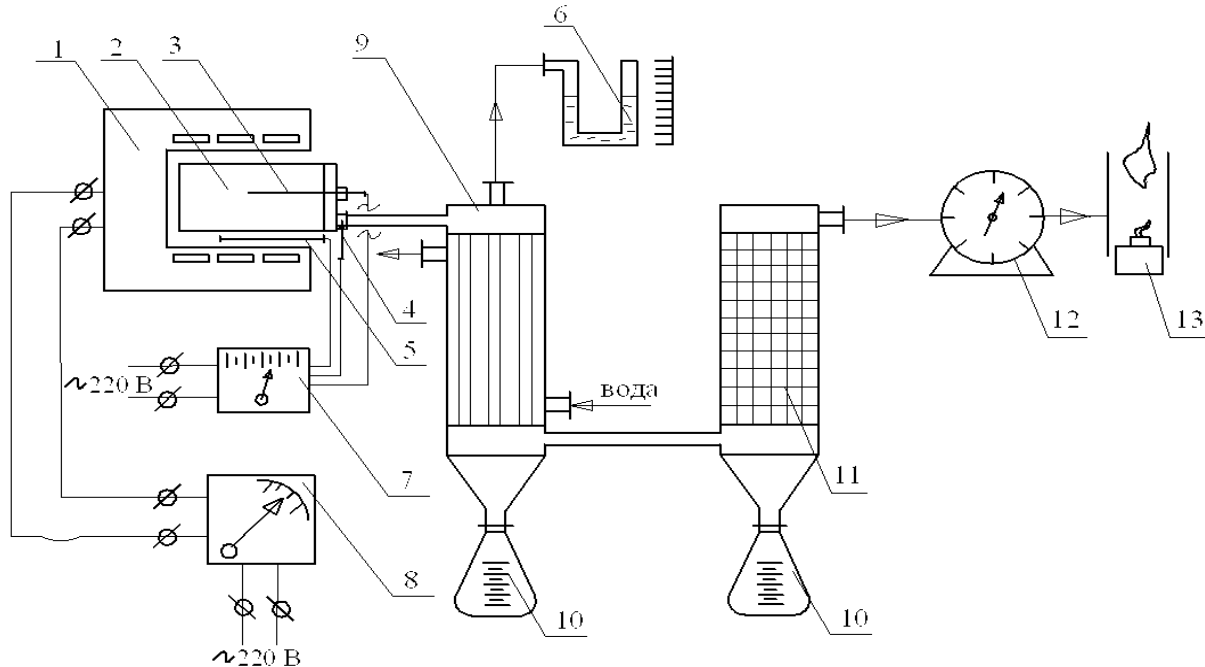


Рис.1 Пилотная установка пиролиза древесины.

1 – муфельная печь; 2 – реторта; 3,4,5 – термопара ХА (хромель-алюмель); 6 – V – образный манометр; 7 – электронный потенциометр замера температур ЭПВ-2, 8 – ЛАТР; 9 – конденсационная система; 10 – емкость для сбора пиротоплива; 11 – фильтр; 12 –газовые часы ГСБ-400; 13 – горелка сжигания неконденсируемых газов.

В каждом опыте составлялся материальный баланс, а полученный конденсат анализировался на содержание летучих кислот, смолы, суммарных фенолов, нейтральных веществ. Из каждой серии по медленному и ускоренному пиролизу были определены средние значения выходов конечных продуктов пиролиза.

Представляло определенный интерес определение динамики выхода

газообразных и жидких продуктов пиролиза, которые представлены на рис 2,3.

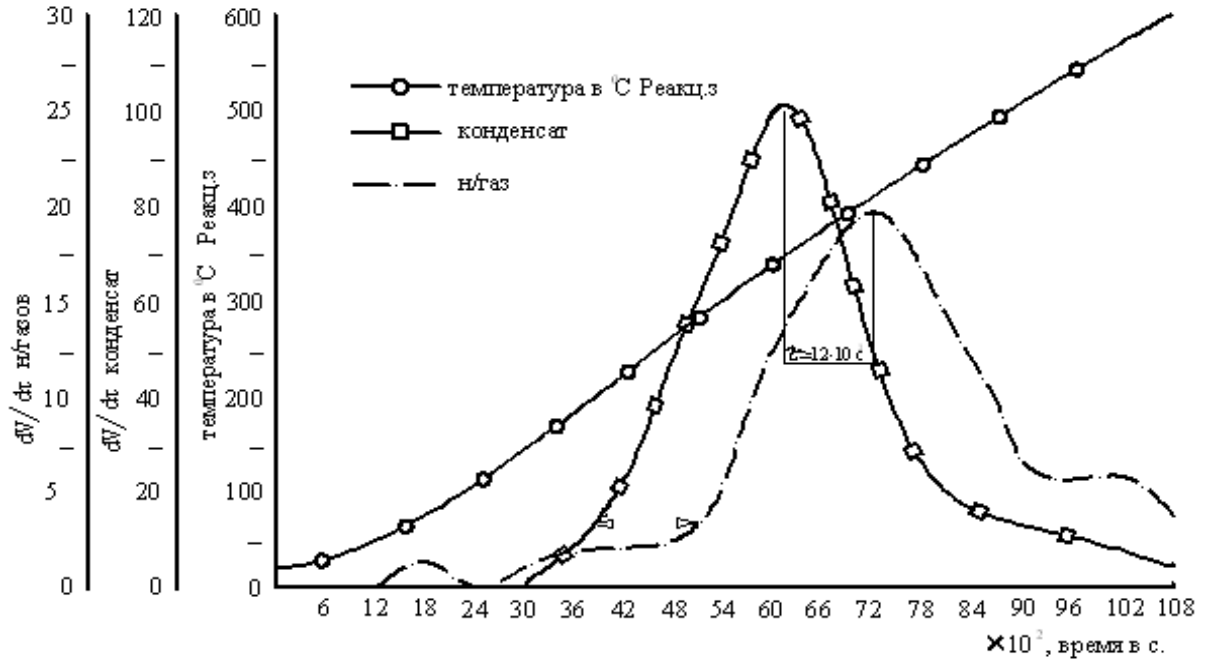


Рис.2 Медленный пиролиз березовой древесины, $q = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, $\tau_{\text{пир}} = 108 \cdot 10^2 \text{ с}$

При медленном пиролизе (Рис.2.) древесины видно, что время тах выхода конденсата находится на $12 \cdot 10^2 \text{ с}$ (на 20 минут) раньше времени основного выделения н/газов пиролиза.

Однако для ускоренного пиролиза (Рис.3.) разница по времени Δt уже составляет $2,5 \cdot 10 \text{ с}$ (4 минуты). Следовательно, наблюдается разница по времени в 5 раз между максимумами выходов н/газов и конденсата.

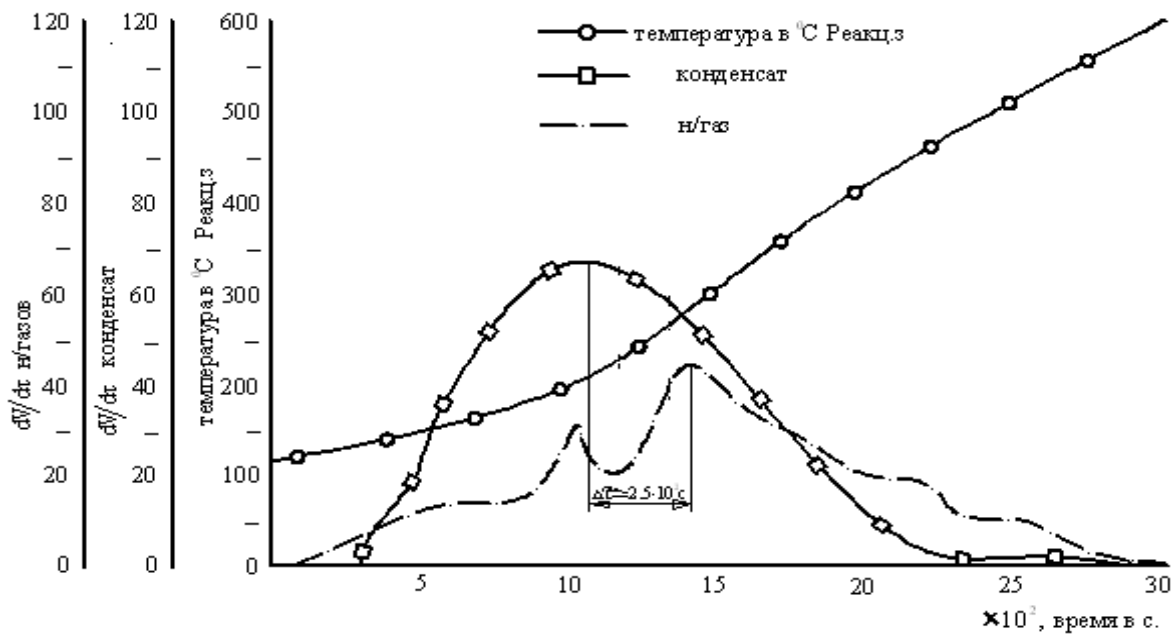


Рис.3 Быстрый пиролиз березовой древесины, $q = 0,33 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, $\tau_{\text{пир}} = 30 \cdot 10^2 \text{ с}$

Сравнение результатов медленного и ускоренного пиролиза показало различие между выходами головных продуктов. Так при ускоренном пиролизе выход угля составил 22,83 % от а.с.д. против 31,51% от а.с.д. при медленном пиролизе. Неконденсируемых же газов образовалось 24,86% от а.с.д., при медленном пиролизе 15,31% от а.с.д.. Выход конденсата по результатам опытов остался, приблизительно, одинаков, но произошло перераспределение входящих в него суммарных фенолов, где выход при медленном пиролизе составлял 3,98%, а при ускоренном 5,65% от а.с.д., суммарная смола в первом случае составляла 19,53%, во втором 21,42% от а.с.д.

Выход летучих кислот по сравнению с медленным пиролизом уменьшился на 0,6% от а.с.д и составил 6,25% от а.с.д., а выход нейтральных веществ наоборот увеличился до 2,51 % от а.с.д. против 2,21% медленного пиролиза.

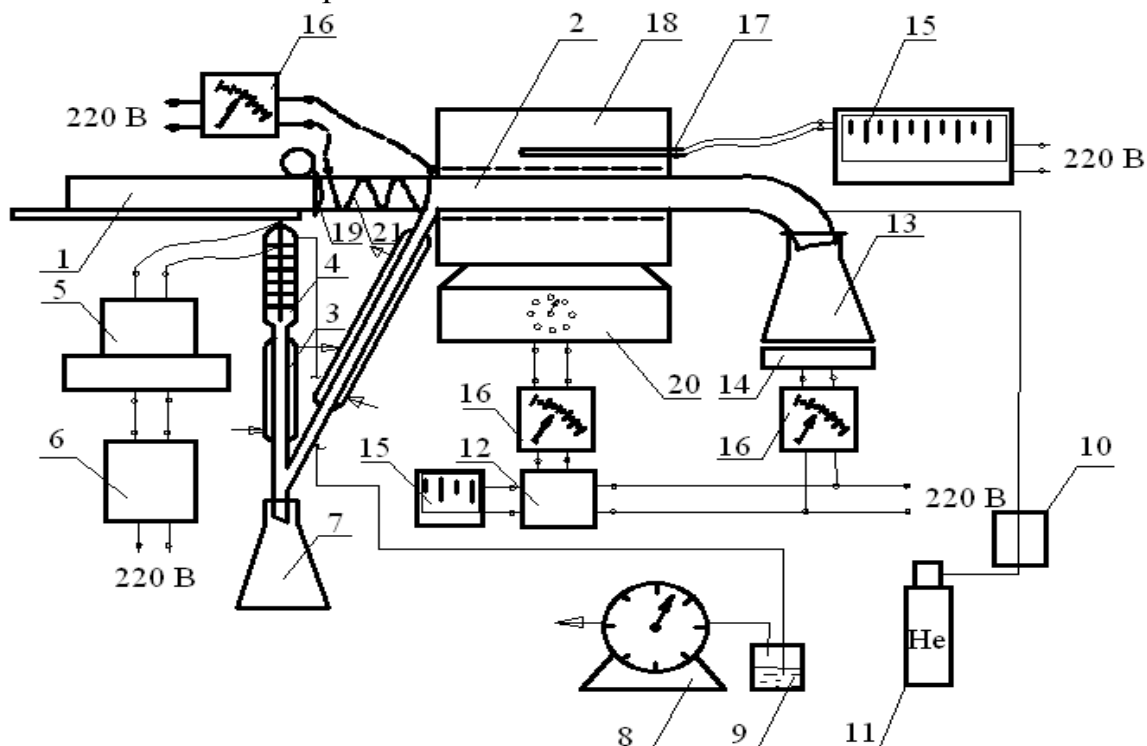


Рис. 4 Схема лабораторной установки пиролиза древесины.

1 – питатель; 2 – кварцевая трубка; 3 – холодильник; 4 – электрофильтр; 5 – катушка Румкорфа; 6 – трансформатор; 7 – приемник конденсата; 8 – нгазовые часы; 9 – гидрозатвор; 10 – ротаметр; 11 – баллон с гелием; 12 – магнитный пускатель; 13 – приемник угля; 14 – подогреватель угля; 15 – электронный потенциометр; 16 – ЛАТР; 17 – термопара ХА; 18 – трубчатая печь; 19 – резиновая мембрана; 20 – секционный регулятор; 21 – подогреватель древесины.

На втором этапе экспериментальной части изучалось влияние режимных факторов, таких как температура реакционной зоны, скорость нагрева, время пребывания парогазов и давление в реакционной зоне на выход и качество продуктов пиролиза. Опыты проводились на

лабораторной установке рис 4.

Проведена серия опытов при температурах реакционной зоны $T_{p,z}$ 500, 600, 700, 800, 900, 1000 °С, скоростей нагрева q от 2,2 до 10 °С/с (метод теплового удара) и времени пребывания парогазов в реакционной зоне в интервале $\tau_{п.г} = 0,01 - 23,80$ с.

Полученные результаты представлены на рис. 5 – 10

Полученные данные (Рис.5) показывают, что при сокращении времени пребывания летучих продуктов разложения древесины в реакционной зоне с 23,8 до 4,4 с выход н/газов падает с 19,4 до 16,6 % от а.с.д., а образование древесно-смоляных продуктов пиролиза в свою очередь растет с 24,4 до 27,4 % от а.с.д. Время пребывания парогазов в реакционной зоне практически не влияет на выход угля, который составляет 20,1-20,7 % от а.с.д.

Результаты пиролиза (Рис.6) показали возможность снижения выхода неконденсируемых газов с 19,5% до 12,8% от а.с.д. при уменьшении времени пребывания парогазов с 1,30 до 0,30 с. В то же время происходит увеличение выхода смолы.

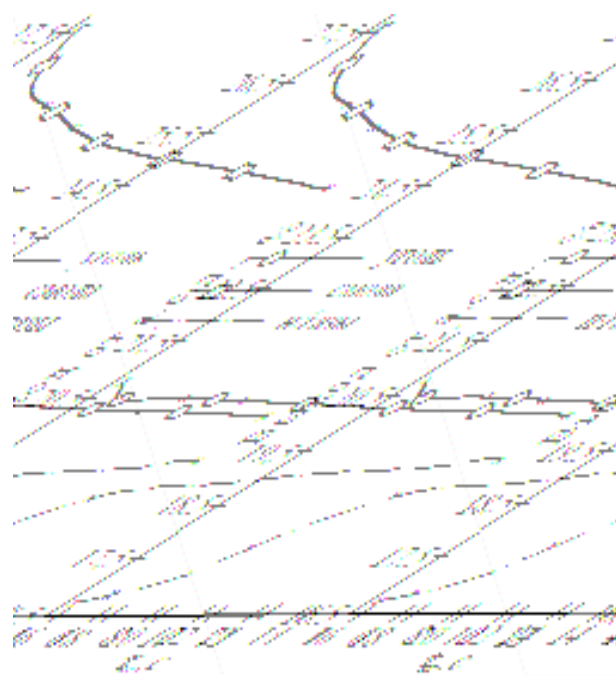


Рис.5 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза. $T_{p,z} = 500$ °С; $\tau_{пир} = 465$ с; $q = 2,5$ °С/с

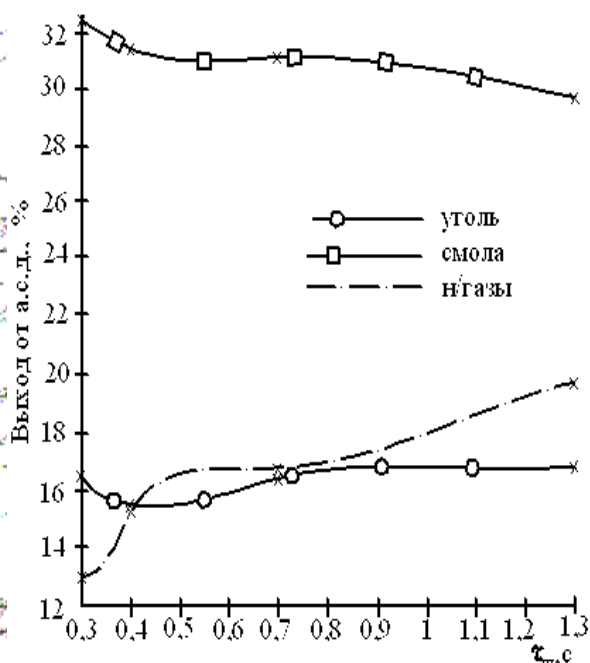


Рис.6 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза. $T_{p,z} = 600$ °С; $\tau_{пир} = 315$ с; $q = 2,5$ °С/с

Достигнутый максимум смолы 31,9% подтверждает определяющее влияние именно времени пребывания парогазов в реакционной зоне на распределение компонентов летучей фазы.

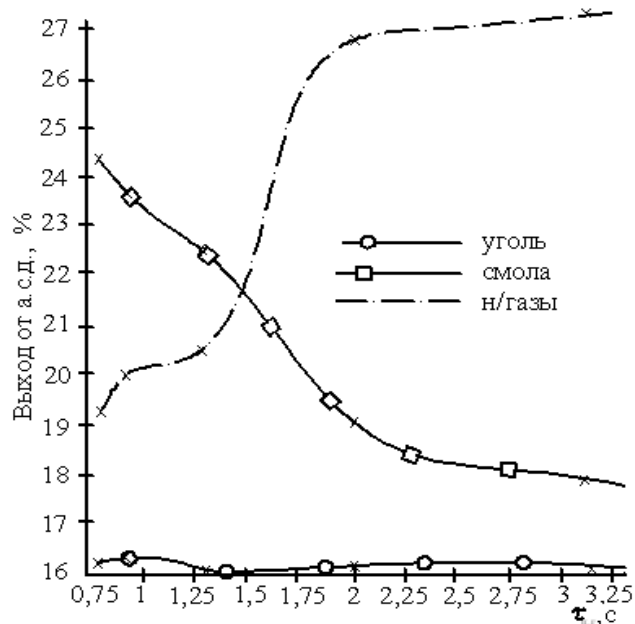


Рис.7 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза.
 $T_{р.з} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{пир} = 240 \text{ с}$; $q = 3 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$

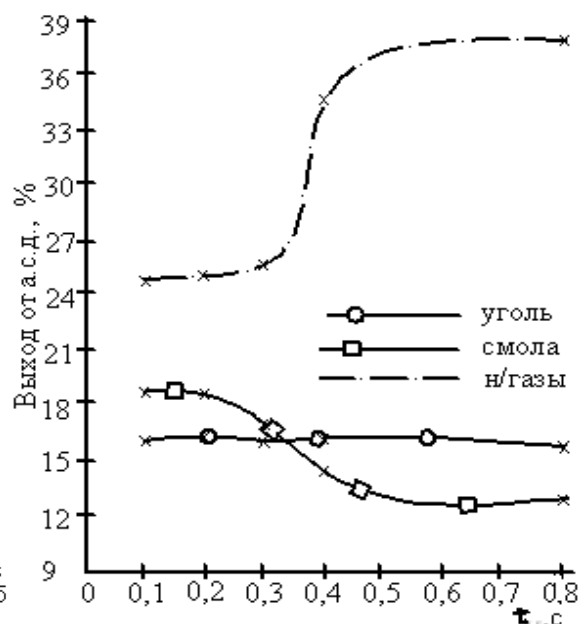


Рис.8 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза.
 $T_{р.з} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{пир} = 150 \text{ с}$; $q = 5,3 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$

Последующее повышение температуры реакционной зоны приводит к резкому уменьшению выхода смолы (Рис.7). Так, при уменьшении времени пребывания паров с 3,1 до 0,8 с выход смолы уменьшился с 24,1 до 17,9 % от а.с.д., а выход неконденсируемых газов соответственно увеличился с 19,4 до 27,1% от а.с.д. Выход угля в каждом опыте постоянен, но повышение температуры ведет к его постепенному снижению. При $T_{р.з} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ угля образуется около 16,2 % от а.с.д.

Повышение температуры реакционной зоны до $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рис.8), изменяет характер выхода смолы и н/газов. Кривые выхода меняют форму (увеличивается их крутизна) с постепенным уменьшением оптимального интервала $\tau_{п.г}$. Также отмечено постоянство в выходе угля (около 15,8% от а.с.д.) при изменении продолжительности пребывания паров в реакционной зоне.

Оптимальное $\tau_{п.г}$ для выхода древесно-смоляных продуктов ($T_{р.з} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$) уменьшается с 0,24 до 0,03 с. Образование смолы увеличивается с 9,1% до 14,0%. В данных условиях (рис 9) наблюдается резкое увеличение выхода н/газов на 19,9% до 49,0 % от а.с.д. Это, по-видимому, связано с парофазным пиролизом древесно-смоляных продуктов при высоких температурах до низкомолекулярных газообразных веществ.

Из результатов последующих опытов повышение температур до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рис.10), скорости нагрева до $10 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$ и времени пребывания паров в реакционной зоне $\tau_{п.г}$ до 0,1с приводит к резкому уменьшению выхода смолы до 5,5% от а.с.д. и явному нарастанию выхода неконденсируемых

газов. Так при $T_{p,з} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличении $\tau_{п.г}$ с 0,01 до 0,07с растет выход н/газов с 30,1% и достигает максимума 57,2% от а.с.д. Количество

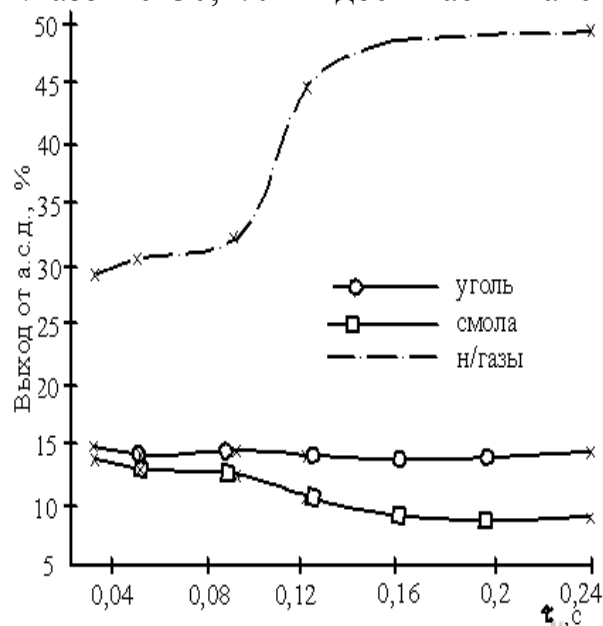


Рис.9 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза.
 $T_{p,з} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{пир} = 126 \text{ с}$; $q = 7,6 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$

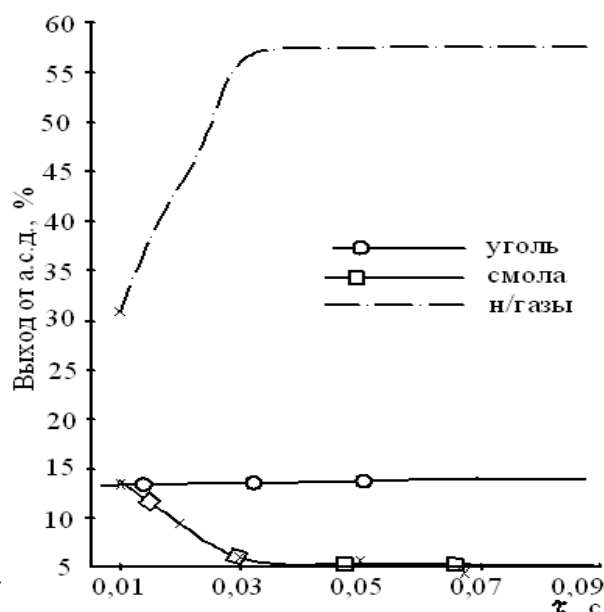


Рис.10 Влияние $\tau_{п.г}$ на выход продуктов пиролиза.
 $T_{p,з} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{пир} = 97 \text{ с}$; $q = 10 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$

образовавшихся газов увеличилось на 27,1% только за счет увеличения $\tau_{п.г}$.

Результаты проведенных опытов однозначно свидетельствуют о наличии определенного температурного предела устойчивости парогазовой смеси пиролиза древесины, который определяется интервалом температур $800\text{-}1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, т.к. при температуре $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\tau_{п.г}$ более 0,03 с наблюдается интенсивное газообразование.

Из полученных данных следует, что для пиролиза с целью увеличения выхода угля необходим постепенный нагрев с регулированием температуры экзотермического выделения тепла. Для сохранения состава и выхода жидких продуктов пиролиза температура реакционной зоны не должна превышать $800 - 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при минимальном $\tau_{п.г}$. Высокий выход н/газов возможен при температуре реакционной зоны не менее $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и времени пребывания парогазов более 0,5 с.

В главе 5 представлена разработанная автором программа "POLY.TERM 2", позволяющая осуществлять прогнозирование температурных полей и распределения температур в формованном слое. В основе алгоритма расчета температуры пиролиза лежит решение краевой задачи теплопроводности и теплового баланса:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{dt}{dx} \right) \text{ уравнение теплопроводности,}$$

$G_{\Gamma} C_{\Gamma} (T_2 - T_1) = G_M C_M (t_{M1} - t_{M2})$ уравнение теплового баланса с краевыми
 $A_f \cdot [T_2 - m \cdot (t_{M1} - t_{M2}) - T_{II}] = \lambda \cdot \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x=R}$, и начальными условиями $\tau = 0$; $t = t_M$;

$T = T''$, где T_1, T_2 - температуры газового теплоносителя в сечениях Y_1 и Y_2 - от места поступления сырья; t_{M1}, t_{M2} - средние по массе температуры кускового сырья в тех же сечениях; T_{II} - температура пиролиза

$m = \frac{G_M \cdot C_M}{G_{\Gamma} \cdot C_{\Gamma}}$ - безразмерное соотношение теплоемкостей потоков материала

и газового теплоносителя, G_M, C_M - расход материала, теплоносителя кг/ч;
 A_f - коэффициент теплоотдачи; λ - коэффициент теплопроводности;
 a - коэффициент температуропроводности.

В результате решения уравнений и ряде допущений, предложены следующие формулы распределения температур частиц сырья и теплоносителя в процессе пиролиза:

Температура поверхности частиц.

$$\Theta_{II} = \frac{t - t'_M}{T'' - t'_M} = \frac{1}{1 - m} + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot \sin k_i \left(e^{-k_i^2 F_0} \right)$$

Температура центра частиц.

$$\Theta_{II} = \frac{t_{II} - t'_M}{T'' - t'_M} = \frac{1}{1 - m} + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot k_i \left(e^{-k_i^2 F_0} \right)$$

Средняя по массе температура частицы.

$$\Theta_M = \frac{t_M - t'_M}{T'' - t'_M} = \frac{1}{1 - m} + \sum_{i=1}^{\infty} 3C_i \cdot \Phi_i \cdot k_i \left(e^{-k_i^2 F_0} \right)$$

Температура газового теплоносителя.

$$h = \frac{T_{\Gamma} - t'_M}{T'' - t'_M}$$

T_{Γ} - средняя температура газового теплоносителя в данном сечении канала.

Проверка достоверности математического описания разработанной программы осуществлялась путем сопоставления расчетных данных "POLY.TERM 2" с данными, полученными в результате пиролиза в реторте формованного слоя на пилотной установке Верхотурского КЭЗа с использованием в качестве сырья отработанной щепы завода.

В расчетах использовались 4 основных типа фракций сырья: усредненная, крупная, средняя, мелкая, а также два варианта формирования слоя: 1й - с порозностью - 0.2 и 2й - с порозностью - 0.4.

На рис.11-15 представлены графики распределения температур для варианта 1.

Расчетная скорость теплоносителя для варианта 1 составляет 40 м/с. Анализ данных графиков показывает о том, как с изменением $d_{\text{ЭКВ}}$ частиц сырья меняется время пиролиза от 45 с при $d_{\text{ЭКВ}} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м до 373 с при

$d_{\text{экв}} = 7,4 \cdot 10^{-3}$ м и необходимая длина реактора от 0.13 до 1.16 м соответственно.

Вариант 1

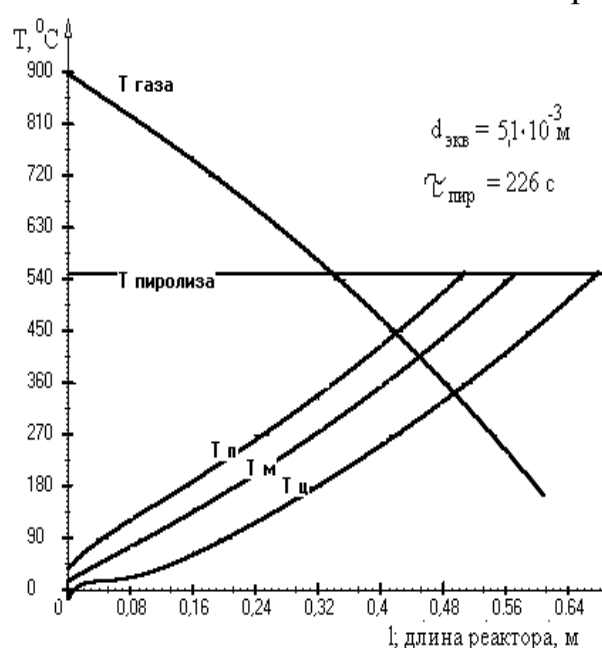


Рис. 11.

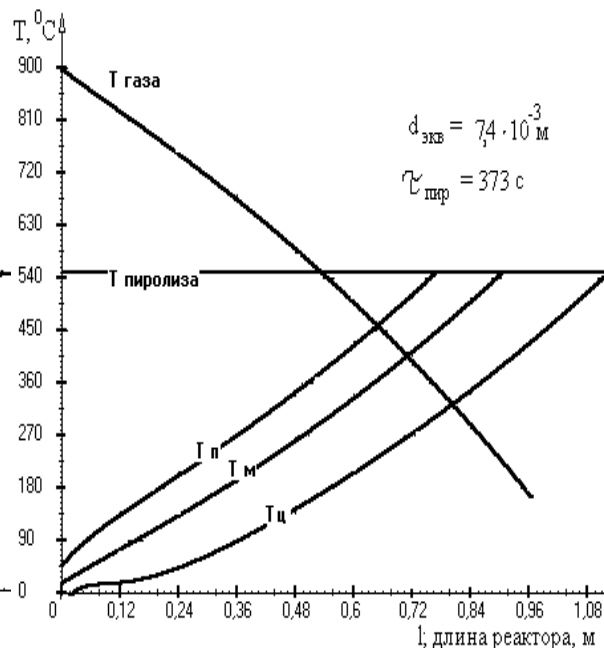


Рис. 12.

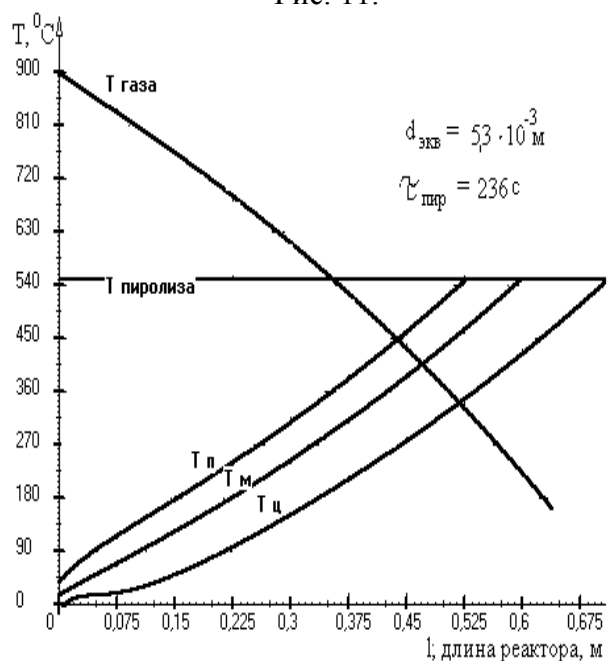


Рис.13.

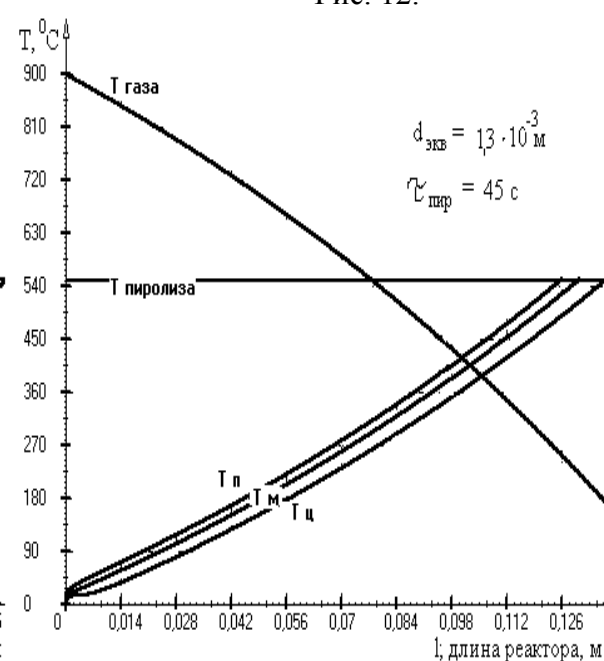


Рис.14.

В варианте 2 повышение порозности до 0.4 приводит к снижению расчетной скорости теплоносителя до 10 м/с. Из представленных графиков видно резкое увеличение времени пиролиза от 102 с. до 650 с., а также размеров реактора от 0.4 до 2.6 м. соответственно при использовании в качестве сырья щепы мелкой, средней и крупной фракции.

Расчеты проведены для модели реторты формованного слоя с

противотоком газового теплоносителя, схема представлена на рис.15.

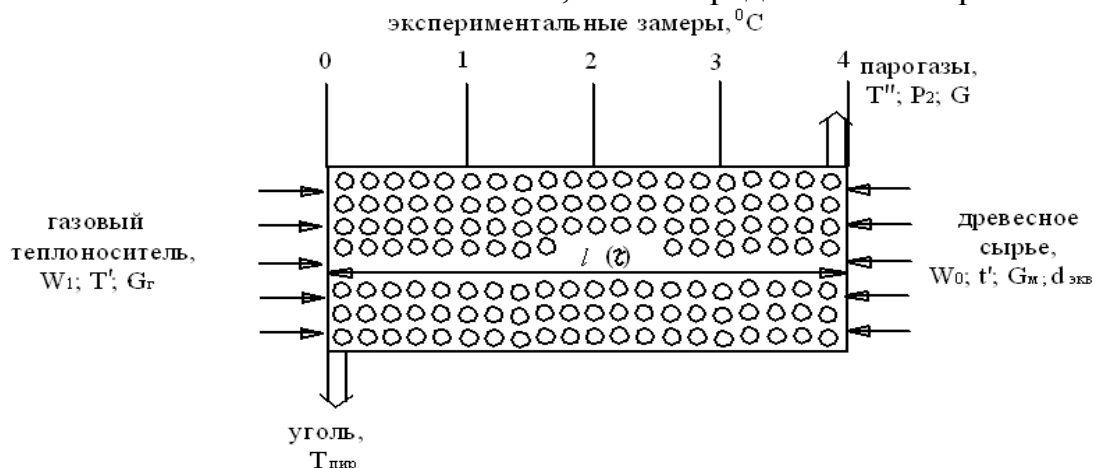


Рис.15. Модель расчета реторты формованного слоя.

0,1,2,3,4 - термодатчики ХА замера температур в реакторе.

Исходные данные для программы "POLY.TERM 2", полученные расчетным путем для варианта 1,2 сведены в табл. 2.

Табл.2 Исходные данные для программы "POLY.TERM 2".

Наименование и единицы измерения	Обозначение в теоретической части	Обозначение в программе "POLY.TERM 2"	Значение для варианта 1 (2)
1. Расход сырья, кг/ч	G_M	GМ	322
2. Расход теплоносителя, кг/ч	G_G	GГ	346,5
3. Скорость подачи сырья, м/ч	u	U	11,05 (14,7)
4. Скорость подачи теплоносителя, м/с	w	W	40 (10)
5. Температура теплоносителя на входе, °С	T'	TGA	900
6. Температура теплоносителя на выходе, °С	T''	TGB	165
7. Температура сырья на входе, °С	t'_M	TC	15
8. Температуропроводность сырья, м ² /ч	a	AP	0,00027
9. Теплопроводность сырья, Вт/м·°С	λ	RL	0,269
10. Порозность слоя	f	Z	0,2 (0,4)
11. Эквивалентный диаметр частиц сырья, 10 ⁻³ м	$d_{экв}$	D	5,1/7,4/5,3/1,3
12. Температура пиролиза, °С	$T_{пир}$	TK	550
13. Расчетное время пиролиза, с усредненной, крупной, средней и мелкой фракции сырья	$\tau_{пир}$	-	226/373/236/45,6 (420/650/445/102,5)

Данные для второго варианта, значения которых отличаются от первого, приведены в скобках.

Сопоставление температур газового теплоносителя по длине реактора

(времени обработки) для экспериментальных данных верхотурской установки формованного слоя и данных, полученных расчетным путем при помощи программы "POLY.TERM 2" представлено на рис.16.

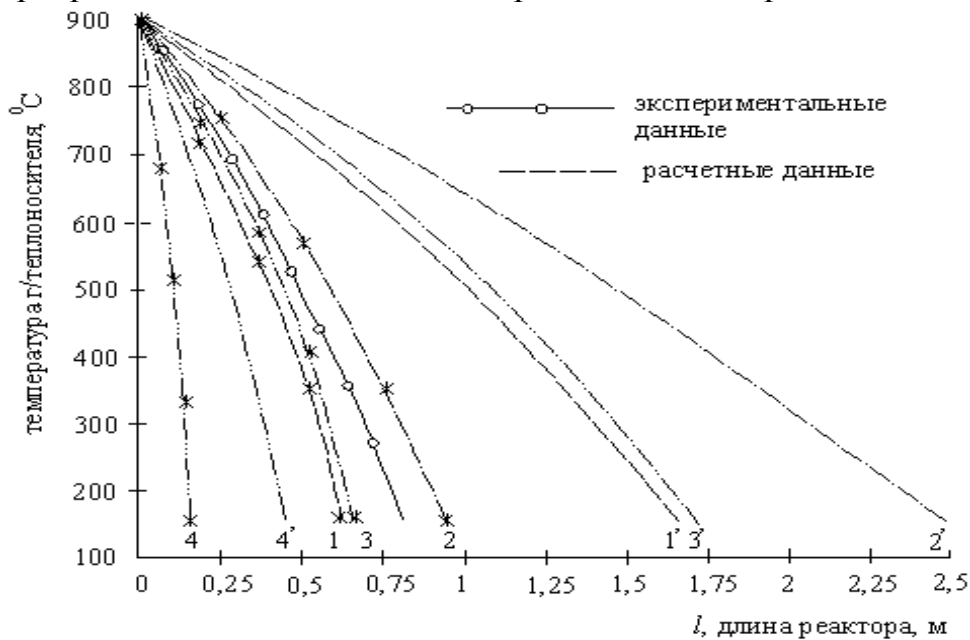


Рис.16. Температуры газовой среды по длине реактора в зависимости от $d_{\text{экв}}$ перерабатываемого сырья.

1 Вариант: 1 – усредненный $d_{\text{экв}}$ крупной, средней, мелкой фракции, $5,1 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $d_{\text{экв}}$ крупной фракции, $7,4 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $d_{\text{экв}}$ средней фракции, $5,3 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $d_{\text{экв}}$ мелкой фракции, $1,3 \cdot 10^{-3}$ м.

2 Вариант: 1' – усредненный $d_{\text{экв}}$ крупной, средней, мелкой фракции, $5,1 \cdot 10^{-3}$ м; ; 2' – $d_{\text{экв}}$ крупной фракции, $7,4 \cdot 10^{-3}$ м; 3' – $d_{\text{экв}}$ средней фракции, $5,3 \cdot 10^{-3}$ м; 4' – $d_{\text{экв}}$ мелкой фракции, $1,3 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис.16 объединены два варианта пиролиза с различной порозностью слоя с целью наглядно отобразить влияние формирования плотного слоя на длительность процесса пиролиза и длину реактора.

По расположению кривых на графике следует, что для оптимизации времени проведения процесса и уменьшения габаритов реактора необходимо создавать плотный слой с повышенными скоростями теплоносителя, а также использовать сырьё узкой фракции с наименьшим эквивалентным диаметром частиц.

В главе 6 представлена технология и оборудование модуля ультраоксипиролиза по переработке древесных лесосечных отходов в формованном слое производительностью 1 т/ч по сырью (рис.17) с получением бионефти и древесного угля.

Основные стадии технологического процесса.

- Измельчение сырья.
- Непрерывная высокотемпературная прямоточная сушка сырья до W_k

10 – 15% топочными газами за счет тепла от сжигания собственных частично обессмоленных парогазов ультраоксипирилиза.

- Непрерывный интенсивный ультраоксипирилиз в реакторе модуля с внутренним нагревом высушенного сырья за счет тепла от сжигания собственных парогазов и генераторного газа от частичной регенеративной газификации получаемого угля.

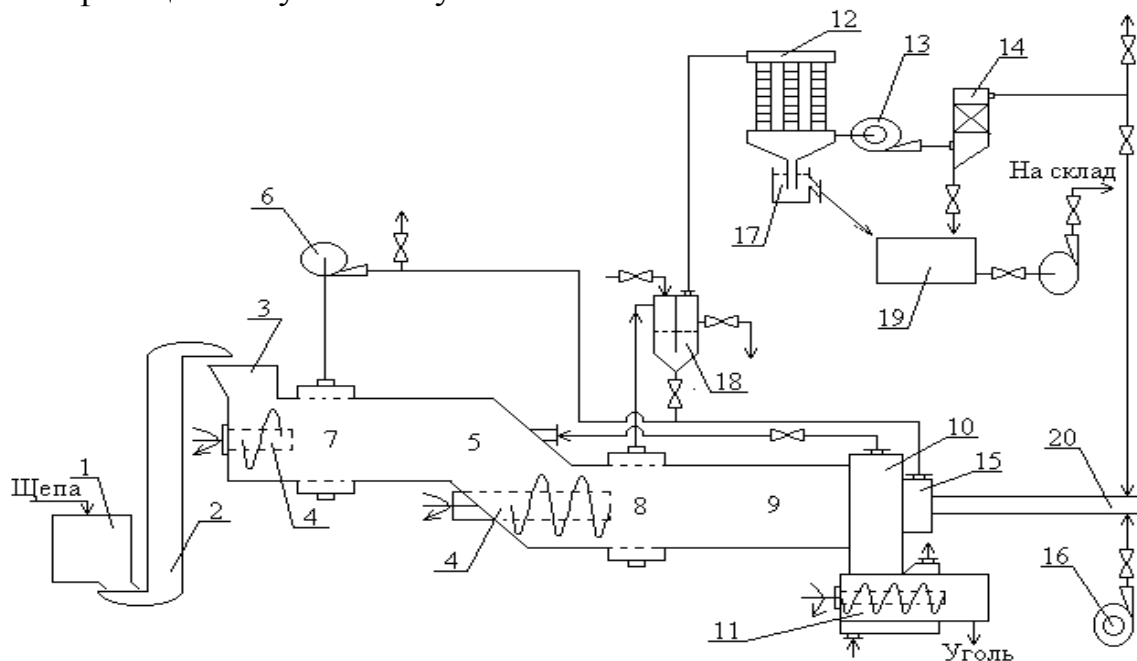


Рис.17 Технологическая схема модуля ультраоксипирилиза.

1 – бункер щепы, 2 – ковшовый элеватор, 3 – приемник щепы, шнековый питатель, 5 – сушилка, 6 – дымосос, 7 – коллектор сушилки, 8 – коллектор реторты, 9 – реторта, 10 – совмещенная топка, 11 – шнековый выгрузатель, 12 – воздушный холодильник, 13 – смолоотделитель, 14 – каплеуловитель, 15 – смеситель, 16 – воздуходувка, 17 – гидрозатвор, 18 – пыльник, 19 – сборник конденсата, 20 – микродиффузионная горелка.

- Охлаждение парогазов ультраоксипирилиза и частичный отбор бионефти в конденсаторе и каплеулавлителе.

- Сжигание части парогазов для формирования теплоносителя ультраоксипирилиза.

- Частичная газификация угля с регулируемым количеством подачи кислорода.

- Отбор древесного угля, охлаждение древесного угля на выходе и доохлаждение его в кубеле.

- Формирование теплоносителя сушки сырья.

Модуль обеспечивает непрерывную, круглосуточную переработку до 7200 т сырья в год с получением 1440т бионефти и 1080т древесного угля. Для данной установки рассчитано предварительное технико-экономическое обоснование. По расчетам прибыль составит 117288 € в год.

Экологическая доброкачественность модуля:

При переработке сырья предлагаемым методом, отходы основного производства отсутствуют.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен аналитический обзор по состоянию и перспективам развития технологий быстрого пиролиза биомассы. Проведено сравнение характеристик отечественного и зарубежного оборудования по основным параметрам: единичная мощность, металло-, энерго-, трудозатраты на единицу продукции. Создана классификация промышленных технологий быстрого пиролиза древесной биомассы по восьми типам: шахтного, барабанного, шнекового, кипящего слоя, вакуумного, в слое уноса, абляционного, формованного слоя. Собраны и представлены материалы по более чем 40 работающим технологиям в России и за рубежом.

2. Выполненные исследования доказали влияние температурно-временных факторов на процесс ультрапиролиза. Выход конечных продуктов определяется не столько условиями подвода тепла в реакционную зону, сколько характером и скоростью нагрева частиц сырья до температуры начала экзотермической стадии термического разложения, а также временем пребывания парогазов в реакционной зоне.

3. Разработана программа "POLY.TERM 2", что позволяет решить следующие задачи: рассчитать распределение температурного поля внутри частиц сырья в определённое время и в заданном сечении по длине реторты; определить целесообразно-необходимую длину \высоту\ реторты для проведения пиролиза в минимальное время; исследовать влияние входных параметров: скорость и температура теплоносителя, размеры частиц и влажность сырья, а также породы древесины и т.д. на конечные результаты пиролиза; определить среднюю по массе температуру кускового сырья в процессе переработки, а также распределение температур газового теплоносителя по длине реторты.

4. Выполнено сопоставление расчетных данных распределения температурных полей по длине реторты, полученных с помощью программы "POLY.TERM 2", с экспериментальными данными модуля ультрапиролиза Верхотурского КЭЗа. Проведенные расчеты показали адекватную сходимость расчетных данных с экспериментальными.

5. Разработана технология и оборудование модуля ультраоксипиролиза мощностью 1 т/час по сырью, отличительными особенностями которого являются: совмещение основных стадий термообработки измельченного сырья в едином аппарате с плотным движущимся формованным слоем и самостоятельными газовыми контурами в каждой зоне; использование для стадии сушки и

ультраоксипирилиза сырья только тепло от сжигания собственных парогазов пирилиза; противоточно-внутреобъемный режим в зоне пирилиза с минимальным временем пребывания парогазов пирилиза в реакционной зоне; оптимальный температурный режим ультраоксипирилиза дающий возможность получить высокий выход бионефти и качественного древесного угля.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Прокопьев С.А. Роль температурно-временных факторов при ультрапирилизе древесного сырья /Киповский А.Я., Пиялкин В.Н., Белоусов И.И., Прокопьев С.А.// ИВУЗ. Лесной журнал. – 2004. – вып.4. – С. 85 – 92.
2. Прокопьев С.А. Разработка технологии ультрапирилиза древесного сырья в формованном слое.//Известия СПбГЛТА. Сборник докладов молодых ученых. – 2006 г. – вып.10. – С. 46 – 51.
3. Прокопьев С.А. Problems and perspectives of woodwaste bio-oil production./ Piyalkin V.N., Prokopiev S.A., Pilschikov Y.N., Shirshikov V.I. // Actual Problems of Biofuel and Bioenergy. International conference. SPb. – 20-22.07.2006. – P. 72 – 75.
4. Прокопьев С.А. Сырье и продукты пирогенетической переработки биомассы дерева/ Пиялкин В.Н., Иванов А.С, Прокопьев С.А.// Учебное пособие. СПбГЛТА. – 2006г. – 67с.
5. Прокопьев С.А. Some questions of bio-oil production from wood feedstock./ Prokopiev S.A., Pilschikov Y.N., Spitsyn A.A., Piyalkin V.N.(SPbFTA, Villemson S.A. (LLC “BIOOIL GRUPP”))// Actual Problems of Biofuel and Bioenergy. The international conference Biofuel and other types of renewable energy. SPb. – 7-8.06.2007. – P. 56.
6. Прокопьев С.А. О возможности получения бионефти из отходов древесного сырья/ Прокопьев С.А., Пильщиков Ю.Н., Молодцев Ю.А. Пиялкин В.Н., Киповский А.Я.// ИВУЗ. Лесной журнал.– 2007. – вып.5. – С. 74 – 85.
7. Прокопьев С.А. О возможности получения бионефти из древесной биомассы/ Известия СПб. ГЛТА. Сборник докладов молодых ученых. – 2007г. – вып.12. – С. 121– 123.
8. Прокопьев С.А. Заявка на патент. Способ производства биомасел и древесного угля из биомассы дерева и сушильно-ретортный модуль для производства биомасел и древесного угля. Приоритет от 18.04.2007. Регистрационный № 2007114649.