



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук*

УДК 620.97

№ гос. Регистрации

Инв. № 01201177721



**УТВЕРЖДАЮ:**  
Директор ОИВ РАН  
академик  
В.Е. Фортов

**ОТЧЕТ**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

по теме:

**«ПРОВЕДЕНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОИСКОВЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЛЕКСНОЙ  
БЕЗОТХОДНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА С  
ПОЛУЧЕНИЕМ ВЫСОКОКАЛОРИЙНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА, КОКСА И АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ».**

Шифр «2011-1.6-516-045-020»

Государственный контракт № 16.516.11.6130 от 20 сентября 2011 г.

**Этап 4: «Обобщение и оценка результатов исследований»  
(заключительный)**

Руководитель работы

В.М. Зайченко






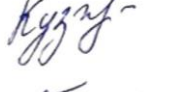


Ответственный исполнитель

М.А. Коростина

Москва

октябрь 2012 г.

### Список исполнителей

Должность	Подпись	Ф.И.О.
Руководитель проекта, д.т.н.		В.М. Зайченко (Введение, Глава 1, Приложение)
М.н.с		М.А. Коростина (Главы 2, 5)
М.н.с		А.К. Смолкин (Главы 5, 6)
Инженер		Г.А. Сычев (Главы 1, 2)
М.н.с		О.А. Иванов (Главы 4, 5)
М.н.с		Ю.С. Кузьмина (Главы 3,4, оформление отчета)
С. н. с., к.т.н.		А.В. Бессмертных (Главы 1,2, Приложение)
С. н. с.		В.Ф. Косов (Главы 4,6)

## РЕФЕРАТ

Отчет 143 с., 21 рис., 24 табл., 1 приложение.

### **Активный уголь, высококалорийное топливо, газификатор, кокс, торф.**

Работа выполняется по государственному контракту между Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Объединенный институт высоких температур РАН от 20 сентября 2011 года № 16.516.11.6130 от по теме: «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области технологий комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей».

Объектом исследования является комплексная безотходная переработка торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей.

Цель работы – разработка научных основ современной комплексной технологии термохимической переработки торфа с целью получения высококалорийного экологически чистого топлива для энергетики, углеродных материалов (кокс, активированный уголь) для использования в различных сферах промышленного производства.

В процессе выполнения 4 этапа государственного контракта проведены обобщение и оценка полученных результатов, разработаны рекомендации по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках, разработан проект технического задания для проведения последующих ОКР по теме «Создание производства установок по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей», проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов, проведены маркетинговые исследования,

проведены исследования по применению результатов НИР, разработан заключительный отчет о НИР.

В результате выполнения работы была создана экспериментальная установка по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей производительностью 8-10 кг/час для производства твёрдого топлива, кокса и активированного угля из торфа.

Основные технологические и технико-эксплуатационные характеристики: предел прочности получаемого кокса при сжатии 18,1 Мпа, содержание углерода в получаемом твердом топливе и коксе 98%, содержание фосфора и серы в получаемом коксе 0,01%, производительность по АУ 1,45 кг/час, йодное число полученного АУ 985 мг/г.

Высокая эффективность процессов тепло- и массообмена обеспечена применением локально псевдоожиженных слоев во всех аппаратах разработанной экспериментальной установки. Такие конструкции могут быть использованы в энергетике, химической промышленности, в промышленности строительных материалов (производство извести, цементного клинкера и т.д.).

Степень внедрения – создана первая установка по разработанной технологии.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	9
1.1	Обобщение работ по 1 этапу.....	9
1.2	Обобщение работ по 2 этапу.....	34
1.3	Обобщение работ по 3 этапу.....	41
2	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ НИР В РЕАЛЬНОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ, А ТАКЖЕ В ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКАХ.....	57
3	ПРОЕКТ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИХ ОКР ПО ТЕМЕ «СОЗДАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА УСТАНОВОК ПО КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОТХОДНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТОРФА С ПОЛУЧЕНИЕМ ВЫСОКОКАЛОРИЙНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА, КОКСА И АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ».....	59
4	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА.....	61
4.1	Распределенная (региональная) энергетика.....	61
4.2	Экономические приоритеты в развитии новых методов получения энергии.....	65
4.3	Оценка необходимых капитальных затрат.....	70
4.4	Производство торфяного кокса и твердого топлива.....	73
4.5	Производство активных углей.....	74
4.6	Выводы.....	76
5	ПРОВЕДЕНИЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	78
5.1	Рынок торфяного твердого топлива и оборудования для его переработки в энергетическое топливо.....	78
5.2	Рынок активного угля и оборудования для его производства.....	85
5.3	Рынок торфяного кокса и оборудования для его производства.....	90
5.4	Зарубежные технологии конверсии биомассы в топливо.....	93
5.4	Выводы.....	101
6	ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР.....	103
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
	ПРИЛОЖЕНИЕ А - ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ.....	113

## ВВЕДЕНИЕ

Обобщение работ по государственному контракту № 16.516.11.6130 «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области технологий комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей» с Министерством образования и науки Российской Федерации, выполнено в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Объектом исследования являются технологии комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей.

Цель работы - разработка научных основ современной комплексной технологии термохимической переработки торфа с целью получения высококалорийного экологически чистого топлива для энергетических нужд, углеродных материалов (кокс, активированный уголь), обладающих высокими потребительскими характеристиками и пригодными для использования в различных сферах промышленного производства.

Перспектива торфяной отрасли заключается в увеличении добычи энергетического торфа для замены дефицитного газа и дальнепривозных углей и мазута, в повышении степени его переработки на основе современных технологий.

Запасы торфа в нашей стране позволяют производить 450÷500 млрд. кВт.ч в год и соответствующее количество теплоты. Это позволит создать на местном топливе мощную региональную энергетику. Местные генерирующие мощности могут использоваться независимо от централизованной сетевой или в качестве резервных. Даже с учетом поправок Европарламента об отнесении торфа к возобновляемым

источникам энергии в пределах годового прироста, добыча торфа может составить 250 млн. т в год. Использование газообразных продуктов делает торф экологически чище других твердых видов топлива.

На предыдущих этапах выполнения работы был произведен аналитический обзор информационных источников по ресурсным базам торфа, проведены патентные исследования, определены перспективные направления комплексной переработки торфа, разработаны программы и методики экспериментальных исследований, разработана математическая модель карбонизации торфа, создана экспериментальная установка, проведены испытания, по результатам испытаний была проведена доработка установки и математической модели.

Основные задачи, решаемые на данном этапе работы, – проведение обобщения и оценки полученных результатов, разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках, разработка проекта технического задания для проведения последующих ОКР по теме «Создание производства установок по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей», проведение технико-экономической оценки рыночного потенциала полученных результатов, проведение маркетинговых исследований, проведение исследований по применению результатов НИР.

При выполнении работ были подготовлены промежуточные отчеты о выполнении НИР:

- «Выбор направления исследований, разработка технической документации».
- «Теоретические исследования, сооружение экспериментальной установки».

- «Экспериментальные исследования режимных параметров комплексной переработки торфа с получением твердого высококалорийного топлива, активированного угля и кокса».



## **1 ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.**

### **1.1 Обобщение работ по 1 этапу**

В процессе выполнения 1 этапа государственного контракта проведен анализ информационных источников по ресурсным базам торфа в России, существующих технологий переработки торфа, определены перспективные направления комплексной технологии переработки торфа, разработаны программы и методики экспериментальных исследований по отработке нового процесса комплексной переработки торфа с получением твердого высококалорийного топлива, активированного угля и кокса, проведены патентные исследования по ГОСТ 15.011-96, проведено математическое моделирование процессов карбонизации торфа с получением высококалорийного топлива, кокса, процесса упрочнения кокса и активации продуктов карбонизации с получением АУ, разработаны теоретические основы функционирования экспериментальной установки по комплексной переработке торфа, разработаны схемные решения по реализации результатов теоретических исследований, разработан технологический регламент производства высококалорийного энергетического топлива, кокса с заданными прочностными характеристиками и АУ с заданными сорбционными свойствами из торфа, разработан эскизный проект экспериментальной установки.

Торф — самое молодое в геологическом отношении твердое горючее ископаемое. Его возраст измеряется тысячелетиями, тогда как возраст углей, нефти и природного газа — миллионами и десятками миллионов лет. В естественном состоянии прирост торфа составляет 1 мм в год. На территории Западной Европы расположено 51 млн. га, Азии — свыше 100 млн. га, Северной Америки — свыше 18 млн. га. Общая площадь торфяных месторождений бывшего СССР составляет около 71,5 млн. га, из разведанных — 47,3 млн. га.

Россия является одной из ведущих торфяных держав мира. Мировые запасы торфа составляют более 500 млрд. тонн. Крупнейшими запасами

торфа обладают (млрд. тонн): Россия – 162; Индонезия – 78,5; США – 36,3; Финляндия – 35; Канада – 35; КНР – 27; Швеция – 11,2; Германия – 7,3; Ирландия – 5,8; Великобритания – 5,7. В России учтено и частично разведано около 45 тысяч торфяных месторождений общей площадью 80,5 млн. га с запасами торфа, составляющими 47% от общего объёма мировых запасов.

Относительная быстрота и комплексность освоения, включая промышленное производство топлива для энергетики, коммунально-бытовых нужд, сельского хозяйства, а также высокоценных угольных материалов, таких как активированный уголь, кокс и полукокс делают торф объектом комплексного использования.

Перечисленные особенности торфа позволили создать в СССР мощную торфяную промышленность, обеспеченную разветвлённой машиностроительной и научно-технической базой. Однако, начиная с 60-х годов прошлого столетия, добыча топливного торфа начала сокращаться, так как в этот период многие крупные электростанции были переведены на более дешёвое и высококалорийное топливо – природный газ.

К концу 80-х годов прошлого столетия в России было выявлено, учтено и разведано 44760 торфяных месторождений разной категории с ресурсами торфа примерно 162 млрд. тонн (см. табл.1.2 и рис.1.1). Наибольшие запасы торфа сосредоточены в Западной Сибири, Северном регионе, на Урале, Дальнем Востоке и на Северо-Западе России.

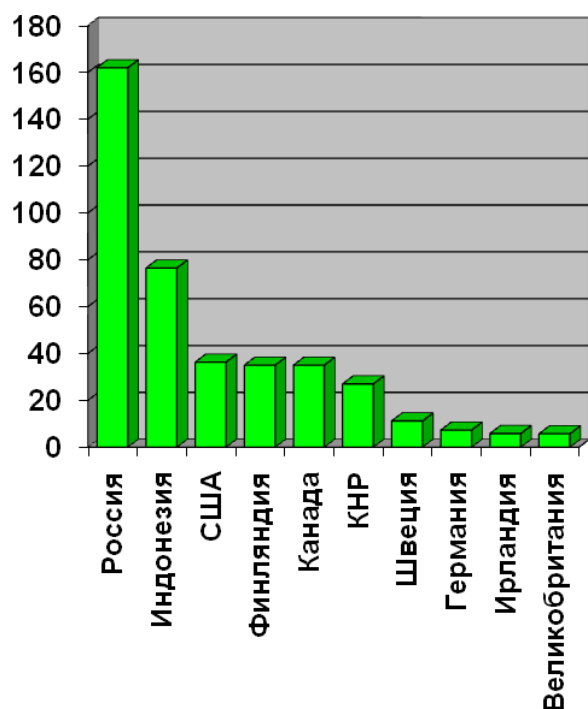


Рисунок 1.1- Распределение мировых запасов торфа, млрд. т

На рис.1.1 приведена диаграмма распределения запасов торфа по странам мира.

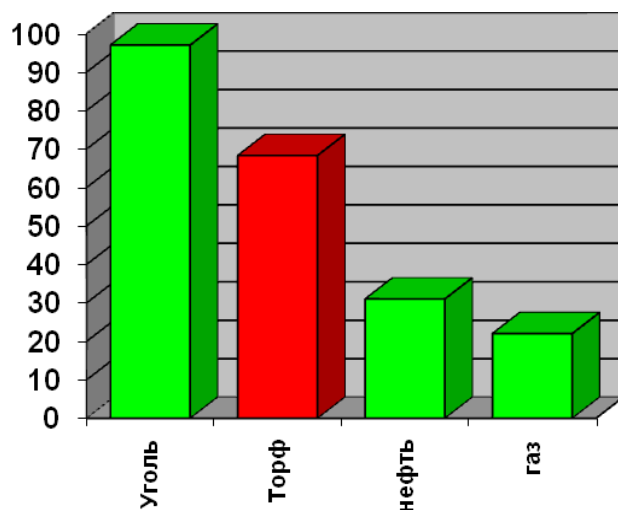


Рисунок 1.2 - Разведанные запасы ископаемых топлив в России (млрд т у.т.)

В Советском Союзе торфяные ресурсы использовались достаточно интенсивно. Была создана мощная, высокоразвитая, оснащенная современной техникой торфяная отрасль народного хозяйства. До 60-х

г.г.торф использовался преимущественно в топливно-энергетических целях, затем доля торфа как топлива стала сокращаться.

Современные технологии термохимической конверсии торфа можно разделить на две основные группы: газификация и пиролиз.

Газификация – это совмещенный процесс сжигания биомассы при недостатке кислорода с получением газообразных продуктов: синтез-газа, генераторного газа, монооксида углерода, водорода, метана, легких углеводородов, двуокиси углерода и азота. Продуктами газификации являются также жидкости (деготь, масла и другие конденсаты), уголь и зола.

Максимальная температура и следовательно интенсивность в зоне газификации биомассы ограничивается температурами плавкости золы торфа.

Таблица 1.1 - Показатели процессов газификации фрезерного и пылевидного торфа

Разработчик	Исход. влага, %	Состав газов, об.%%							Теплота сгорания, МДж/нм <sup>3</sup>	Выход газа, нм <sup>3</sup> /кг	КП Д
		CO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>			
ВНИГИ	36	8,3	0,8	0,2	23,7	11,8	1,7	53,5	5,7	1,56	65
ГИАП	11	16,6	0,3	-	13,0	17,2	2,3	50,6	4,4	2,11	54
ГИАП*	11	19,7	0,1	-	30,0	30,5	2,3	17,4	7,8	1,27	63
ИИНСТО РФ	6	10,5	0,2	0,3	20,6	17,4	2,4	48,6	5,9	2,19	67

\*Дутье, обогащенное кислородом

Достоинство газификации: довольно высокая степень конверсии энергии исходного торфа в энергию получаемого газа. Недостаток: низкие теплотехнические характеристики газа: теплотворная способность (1400 ккал/нм<sup>3</sup>) и температура горения (расчет по составам газов дает максимум 15000С).

Пиролиз – это технология термической конверсии биомассы без участия кислорода с получением твердых, жидких и газообразных продуктов.

Технологии пиролиза позволяют получать газообразные, жидкие и твердые продукты. Современные западные технологии ориентированы на

получение жидкого продукта, т.н. пиролизного масла. Работы, выполненные ОИВТ РАН, направлены на исследование процессов пиролиза с получением из биомассы экологически чистого безопасного газообразного топлива с высокими теплотехническими параметрами и твердых углеродных материалов широкого промышленного назначения.

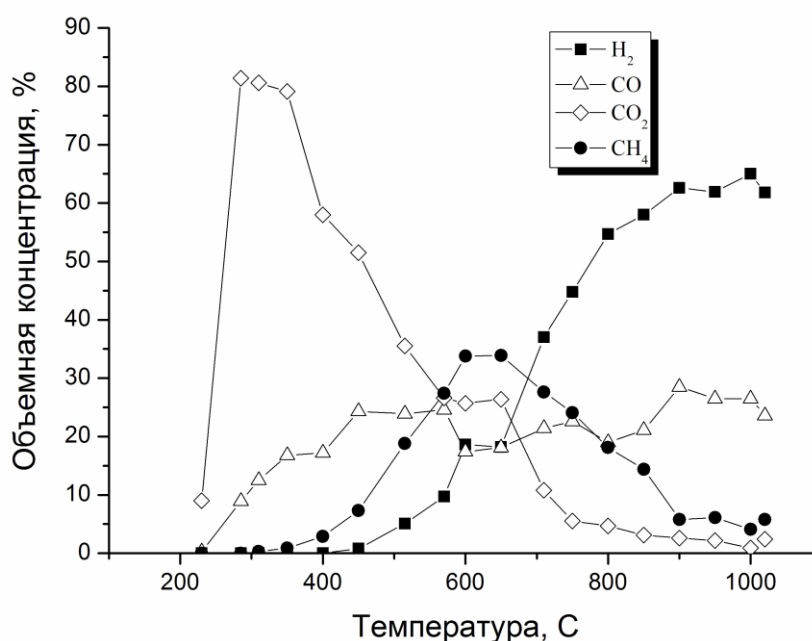


Рисунок 1.3 – Состав пиролизных газов при различной температуре пиролиза

Суммарный выход газообразных продуктов составляет 0.34 нм<sup>3</sup> на кг исходного сухого продукта, а их удельная теплотворная способность равна 11.7 МДж/нм<sup>3</sup> (2800 ккал/нм<sup>3</sup>).

На рис.1.4. представлена энергетическая диаграмма процесса пиролиза торфяных пеллет.

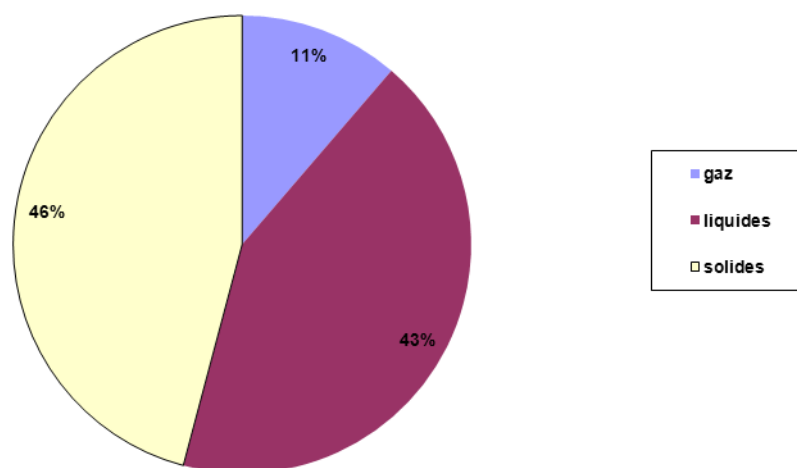


Рисунок 1.4 – Энергетическая диаграмма процесса пиролиза при 900<sup>0</sup>С

В экспериментах наблюдался саморазогрев сырья.

Логично предположить, что причиной является экзотермичность реакций, протекающих при пиролизе и обуславливающую положительную величину суммарного теплового эффекта пиролиза. Обычно ее оценивают в количестве 5,9% от теплотворной способности сырья.

В свое время в Советском Союзе были разработаны и проверены в промышленных условиях технологические схемы газификации торфа и получения на его основе жидких топлив. В настоящее время осуществляется соответствующая работа по созданию производства по комплексной малоотходной переработке верхового торфа с получением новых материалов на основе термо-биохимического синтеза.

Из всех горючих полезных ископаемых только торф является возобновляемым. Стоимость тепла, вырабатываемого на торфяном топливе в котельных ЖКХ, в два раза ниже по сравнению с теплом, вырабатываемом на каменном угле.

Всё вышесказанное свидетельствует о необходимости возрождения и развития в современных условиях торфяной промышленности России, которая была сформирована в СССР как одна из отраслей топливно-энергетического комплекса и специализировалась на добыче торфа в качестве местного топлива для электростанций, коммунально-бытовых потребителей, предприятий агропрома и населения. В 70-х годах прошлого

столетия добывалось до 50 млн. тонн и использовалось на электростанциях более 25 млн. тонн топливного торфа.

Одним из наиболее крупных потребителей топлива является коммунально-бытовой сектор, потребность которого достигла 50% общего объёма твёрдых топлив. Потребление торфа в качестве коммунально-бытового топлива составляло около 11 млн. тонн (4,1% от общей потребности в топливе). Максимальное потребление наблюдалось в Центральном районе России и достигало 18,2% от общей потребности.

Перспективным направлением является технология торрефикации гранул. В результате торрефикации pellets становятся негигроскопичными и их можно хранить длительный срок. Кроме того, повышается объемная энергоёмкость топлива, что экономически выгодно при перевозках на сравнительно далекие расстояния.

Характеристики гранул должны удовлетворять следующим требованиям:

Калорийность 4000-4500 Ккал/кг

Влажность не более 15%

Зольность не более 3%

Производство торфяного полукокса и кокса из кускового торфа развивалось по пути непрерывно действующих печей при сжигании другого топлива с подводом тепла через стенку печи (внешний обогрев), путем ввода горячих газов в слой торфа (внутренний обогрев), смешением с нагретым твердым теплоносителем.

Экспериментальными работами установлена возможность использования для коксования хорошо высушенного кускового и мелкокускового торфа непрерывно действующих камерных печей с пиролизом парогазовой смеси в слое раскаленного кокса.

Сравнительно низкая плотность торфяного полукокса и кокса определяет хорошую газопроницаемость засыпки из этих материалов.

Ряд ценных специфических свойств торфяного кокса и полукокса определили высокую эффективность использования их вместо древесного и каменноугольного кокса в качестве восстановителя при производстве высококачественных сталей, ферросплавов, сероуглерода, в качестве сырья для производства активных углей, карбюризатора для цементации стали, раскислителя в стекольной промышленности, кузнечного топлива.

Использование активированных углей в промышленности получило широкое развитие и имеет очень большое практическое значение. Редкая отрасль промышленности не использует или не соприкасается с сорбционными процессами.

Специальная обработка углеродсодержащих продуктов, приводящая к увеличению поверхности углей, кокса и других богатых углеродом веществ, сопровождается значительным увеличением поглощающей способности углей.

При получении активных углей в виде гранул необходимо соблюдение таких условий производства, при которых полученный активный уголь имеет сильно развитую поверхность не только с наружной части куска, но и сильно развитую поверхность пор и капилляров, пронизывающих весь внутренний объем куска.

Обычное обугливание торфа приводит к получению полукокса или кокса, обладающего слабыми сорбционными свойствами. Однако высокая реакционная способность торфяного кокса позволяет у этих продуктов проще и более легко, чем у других продуктов (например, каменные угли), увеличить сорбционную способность, например, путем частичного сжигания обугленного материала.

Частичный обгар углерода торфяного полукокса и других продуктов можно произвести путем обработки активируемого продукта кислородом воздуха, углекислотой и парами воды.

Частичное выгорание углерода приводит к тому, что мало развитая, часто стекловидная, глянцевая поверхность наружных частей и внутренних



стенок капилляров угля делается матовой, как бы разъеденной. Общая поверхность угля в результате значительно возрастает и одновременно растет и сорбционная способность угля.

Патентные исследования были проведены по теме «Технологии комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей».

Целью проведения патентных исследований является выявить и провести анализ новых разработок установок для переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей.

Результаты проведенного патентно-информационного исследования свидетельствуют о перспективности исследований в области безотходной термической переработки биомассы, в частности торфа.

Обнаруженные патенты, относящиеся к объектам исследований, свидетельствуют о том, что в настоящее время существует определенный задел в научных исследованиях. При этом разработки в этой области продолжаются, о чем свидетельствует большая изобретательская активность.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что выбор направления исследования проекта разработка термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей актуален и обоснован высокотехнологичностью и перспективами качества продукта на уровне мировых стандартов.

В соответствии с техническим заданием и календарным планом Государственного контракта № 16.516.11.6130 были разработаны программы и методики экспериментальных исследований по отработке нового процесса комплексной переработки торфа с получением твердого высококалорийного топлива, активированного угля и кокса.

Состав газа и теплотворная способность исследуется с помощью метода хроматографии. Для определения теплоты сгорания твердого топлива применяется метод с использованием термоанализатора. Анализ кокса на реакционную способность проводится по методу, установленному в ГОСТ 10089-89, основанному на реакции кокса с  $\text{CO}_2$ . Метод определения суммарной пористости по воде основан на определении объема воды, заполняющей практически все открытые поры и пригоден для активных углей с характерным размером зерна 0,2–5 мм.

В настоящее время существует большое количество работ посвященных математическому моделированию процессов термического разложения органических веществ.

В рамках поставленной задачи последовательно рассматриваются модели пористых сред, химического реагирования (процессы карбонизации, уплотнения, кокса и его активации) в пористых средах с учетом изменения внутренней структуры. Рассмотрены регулярные и стохастические модели.

Процессы химического реагирования в пористых средах можно условно разделить на две группы: процессы идущие с разрушением пористого скелета (реакции горения, газификации и т.д.) и процессы, идущие с заполнением пор (каталитические реакции, реакции с выделением вещества на поверхности и т.д.). Оба процесса находят широкое применение в различных технологических установках.

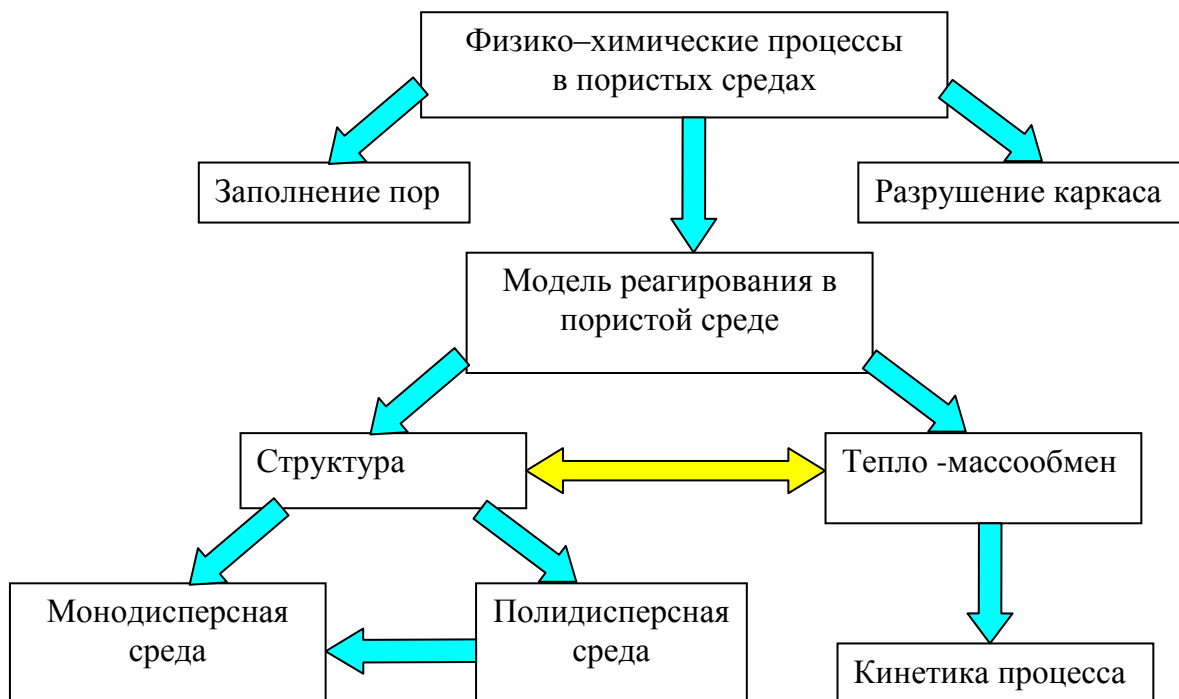


Рисунок 1.5 - Классификация моделей

В реальных пористых материалах часть пор недоступна с внешней поверхности и дает вклад в так называемую закрытую пористость.

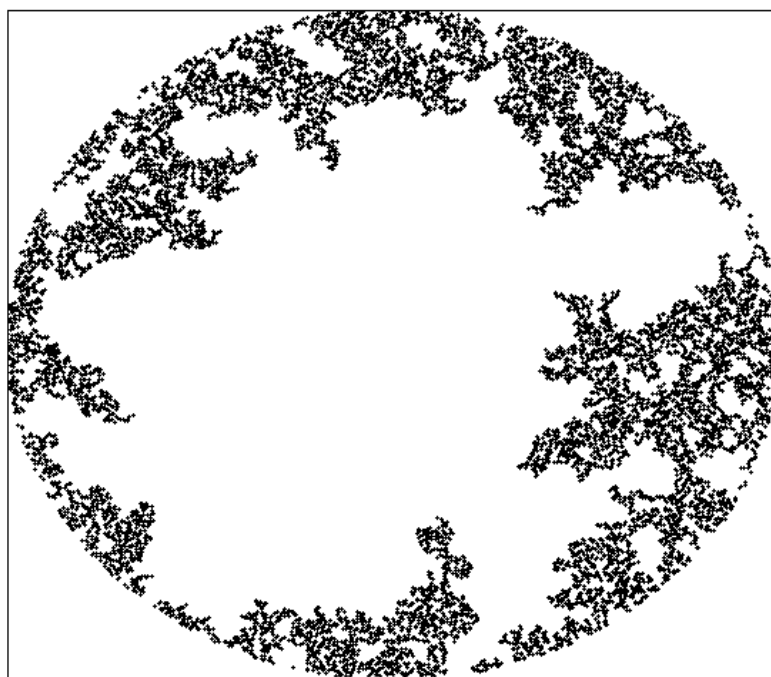


Рисунок 1.6 - Открытая пористость (пространство пор – черное)

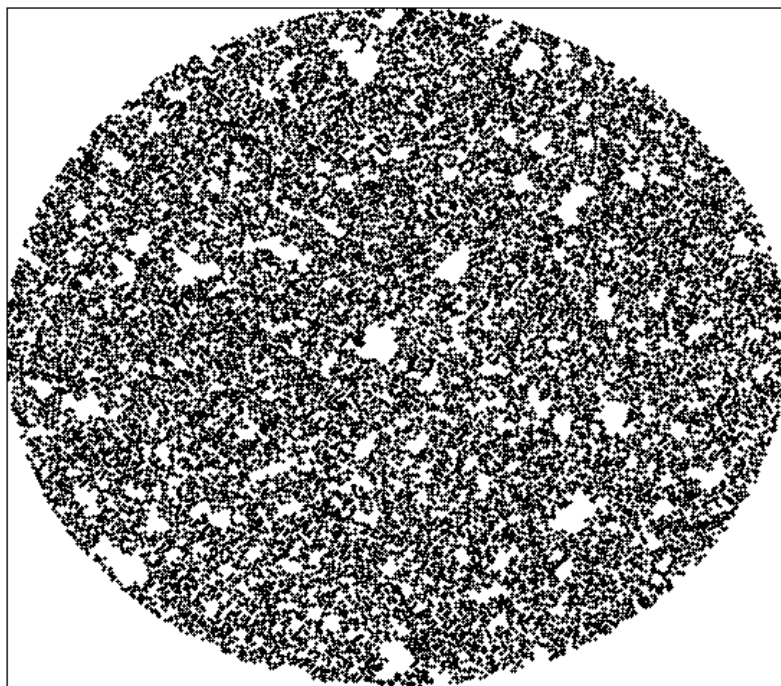


Рисунок 1.7 - Открытая пористость (пространство пор – черное)

Характерной особенностью существующих моделей является их применимость к достаточно мелким частицам (характерный размер 50-100 мкм). В связи с этим предполагается мгновенный прогрев частицы по всему объему и неизменность ее пористости в процессе термической деструкции. Для мелких частиц реакции пиролиза протекают в кинетическом режиме во всем объеме частицы.

Для крупных частиц при высоких тепловых потоках скорость выделения летучих лимитируется не кинетикой процесса, а диффузионным (или фильтрационным) сопротивлением прохождению газифицирующихся летучих через твердую массу топлива.

Целью работы является построение математической модели для расчета процессов пиролиза крупных частиц органического топлива без детальной кинетики на основе общепринятых брутто-реакций процесса с использованием минимального количества подгоночных коэффициентов и наиболее «универсальных» констант процесса и определение основных параметров процесса (характерные время, размер частиц, температура и т.д.).

Процесс пиролиза можно представить в виде глобальной реакции:  
**ТОРФ → УГЛЕРОДНЫЙ ОСТАТОК + ЛЕТУЧИЕ**

Для моделирования процесса термической деструкции используем одноканальную модель.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = k(V^* - V), \quad (1.1)$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.2)$$

где  $V$  – количество выделившихся летучих,  $k$  – константа скорости реакции,  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $E$  – энергия активации,  $T$  – температура частицы.

На рис. 1.8 представлены зависимости выхода летучих от времени для частиц разного радиуса.

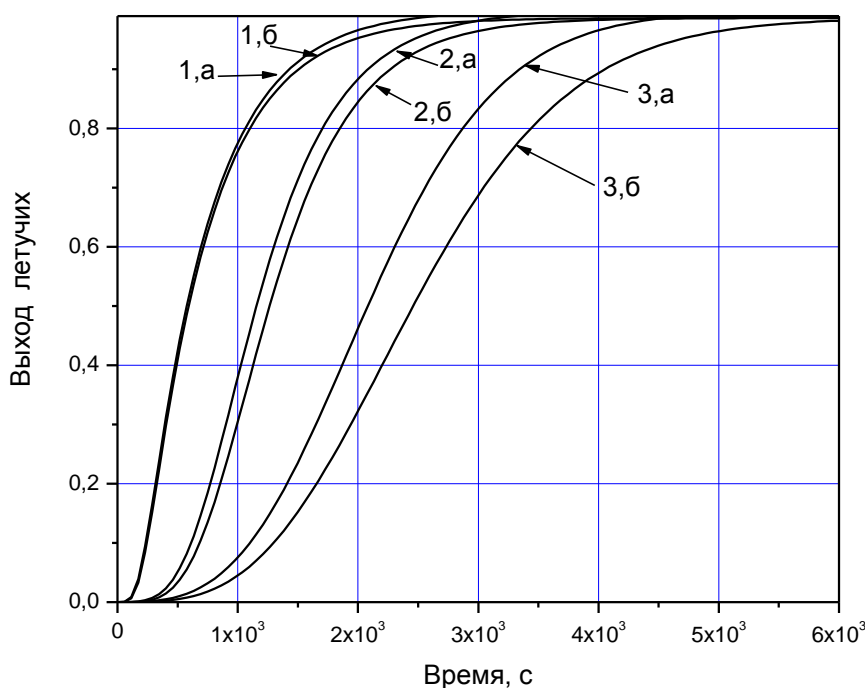


Рисунок 1.8 - Зависимость выхода летучих от времени для частиц различного радиуса, г,м: 1–0.003, 2–0.01, 3–0.02; а) летучие в газовой фазе внутри частицы, б) летучие, покинувшие частицу

Продуктами пиролиза являются: пиролизные газы; твердый угольный остаток; жидкая фракция, собираемая в конденсоре с температурой 20<sup>0</sup>С и представляющая собой смесь пирогенетической воды

и дегтя. Количество и качество конечных продуктов пиролиза естественно зависит от свойств исходного продукта (в данном случае торфа), конечной температуры нагрева, темпа нагрева и других условий. В данной записке остановимся лишь на некоторых, по мнению авторов основных, факторах, определяющих путь дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых могут быть положены в обоснование новой технологии термической переработки торфа.

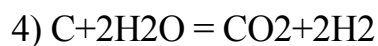
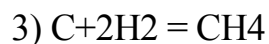
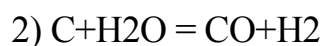
В соответствии с техническим заданием на выполнение данной НИР экспериментальная установка должна удовлетворять следующим требованиям:

- производительность по твердому топливу, либо коксу 10 кг/час. Точность определения  $\pm 3\%$ .
- предел прочности получаемого кокса при сжатии - не ниже 15 МПа;
- содержание углерода в получаемом твердом топливе и коксе - не ниже 95%;
- содержание фосфора и серы в получаемом коксе - не выше – 0,02%
- производительность по АУ 1 кг/час. Точность определения  $\pm 3\%$ .
- йодное число получаемых АУ в зависимости от режимов получения от 600 до 1200 мг/г. Точность определения  $\pm 5\%$ .

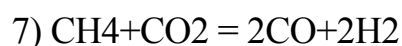
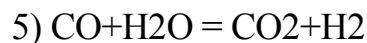
При комплексной переработки торфа происходят многие химические реакции, которые в конечном счете и определяют возможность получения тех или иных продуктов в определенном диапазоне термодинамических параметров. Химизм процесса весьма сложен: имеют место многие гомогенные и гетерогенные реакции. Термодинамический анализ позволит наметить пути оптимизации процесса комплексной переработки торфа.

Основные реакции при комплексной переработке торфа следующие:

– гетерогенные 1)  $C + CO_2 = 2CO$



– гомогенные (в газовой фазе)



Термохимические уравнения обычно записываются в стехиометрических соотношениях с указанием агрегатного состояния реагентов и теплового эффекта с соответствующим знаком:



Было условлено, что эффекты эндотермических реакций (система поглощает теплоту, т.е. “прибавляет” себе) пишутся со знаком “+”, а экзотермические (система отдает, т.е. “отнимает” от себя) со знаком “-“. Тепловой эффект относится к одному пробегу реакции, т.е. когда левая часть термохимического уравнения полностью превратилась в правую часть.

Теплотой образования какого-либо сложного химического соединения называется тепловой эффект реакции образования одного грамм-моля соединения из простых веществ, взятых в устойчивом состоянии. Теплоты образования простых веществ принимают равными нулю. Т.к. теплоты образования зависят от температуры и давления, то условились относить их к так называемому стандартному состоянию, определяемому так: все вещества в этом состоянии находятся в чистом виде при давлении 1 атм. ( $1,0133 \cdot 10^5 \text{Па}$ ), причем газообразные вещества находятся в идеальном газе состоянии. Температуру можно выбрать произвольно, но теплоты образования табулированы для температуры 298,15К (250С). Обозначения стандартных теплот образования:  $\Delta H_{298}^0$ .

Закон Гесса позволяет рассчитывать неизвестные тепловые эффекты по известным.

Величина тепловых эффектов зависит от температуры. В аналитической форме эта зависимость выражается законом Кирхгофа:

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_p = \Delta C_p \quad (1.3)$$

В уравнении (1.3)  $\Delta C_p = \sum_{\text{прод}} C_{p\text{прод}} - \sum_{\text{всх}} C_{p\text{всх}}$ . Эта величина численно равна изменению теплоемкости системы при одном пробеге реакции.

Значения тепловых эффектов приведены к стандартным состояниям. В термодинамических таблицах имеются данные для расчета тепловых эффектов в стандартном состоянии для практически всех интересующих нас реакций.

Температурные зависимости теплоемкости обычно выражают через полиномы двух видов:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (1.4)$$

$$C_p = a + bT + c/T^2 \quad (1.4a)$$

Значения коэффициентов также приведены в термодинамических таблицах.

Энтропия является экстенсивным параметром, т.е. она аддитивна, поэтому энтропию реакции можно вычислить по алгебраической сумме реагентов:

$$\Delta_r S = \sum_{\text{прод}} S_{\text{прод}} - \sum_{\text{всх}} S_{\text{всх}} \quad (1.5)$$

В термодинамических таблицах приводятся значения энтропии для многих веществ в стандартном состоянии. Изменение теплоемкости системы аналогично при вычислении тепловых эффектов по интегральному закону Кирхгофа.

При рассмотрении второго закона было установлено, что изменение энтропии может быть критерием возможности или невозможности самопроизвольных процессов и установления равновесия только в изолированной системе ( $dS < 0$ ,  $dS > 0$ ,  $dS = 0$ ). В реальных процессах в неизолрированных системах энтропия может как уменьшаться, так и



увеличиваться. Поэтому возникла необходимость в новых критериях равновесия и направления процессов.

Разработанный Дж. В. Гиббсом метод термодинамических потенциалов позволяет определить термодинамическую возможность осуществления тех или иных реакций. Мы используем изобарно-изотермический потенциал (большой потенциал Гиббса). Методы расчета этого потенциала и его зависимости от температуры, а также расчета тепловых эффектов реакций изложены в руководствах по общей и химической термодинамике. Тепловые эффекты и энтропии в зависимости от температуры рассчитываются по тепловым эффектам и значениям энтропии при стандартных условиях (298, 15 К и 1атм) и разности теплоемкостей продуктов и исходных веществ, взятыми с их стехиометрическими коэффициентами. Теплоемкости реагентов в зависимости от температуры обычно выражаются полиномами различных видов. Мы использовали полином  $C_p = a + bT + cT^2$ . Тепловые эффекты образования и энтропии реагентов при стандартных условиях и коэффициенты  $a, b, c$  приводятся в термодинамических таблицах. Уравнение для расчета теплового эффекта с использованием приведенного выше полинома:

$$H(T) = H_{298} + \Delta a(T - 298) + 0,5 \cdot \Delta b \cdot T^2 - \Delta c \cdot (1/T - 1/298), \text{ где} \quad (1.6)$$

$H_{298}$  – тепловой эффект реакции при стандартных условиях.

Рассчитывается по теплотам образования реагентов в соответствии с законом Гесса. Теплоты образования простых веществ принимаются равными нулю.

Энтропия реакции рассчитывается по уравнению:

$$S(T) = S_{298} + \Delta a \cdot [\ln(T) - \ln(298)] + \Delta b \cdot (T - 298) - 0,5 \cdot \Delta c \cdot (1/T - 1/298),$$

где  $S_{298}$  – изменение энтропии реакции в стандартных условиях.

Рассчитывается по абсолютным значениям стандартной энтропии реагентов.

Изменение потенциала Гиббса в зависимости от температуры:

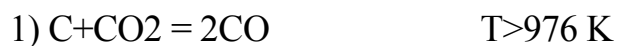
$$Z(T) = H(T) - T \cdot S(T) \quad (1.7)$$

При этом реакции с образованием продуктов (вправо) имеют место при отрицательных значениях потенциала, а при положительных значениях

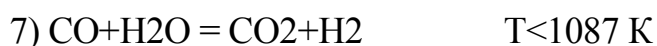
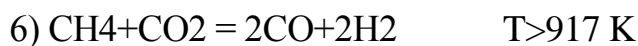
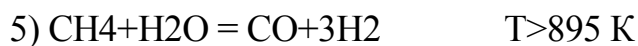
$Z(T)$  реакции термодинамически невозможны. При  $Z(T)=0$  наступает равновесие.

Термодинамическая возможность реакций характеризуется следующими диапазонами температур.

Гетерогенные реакции



Гомогенные реакции



Химическое равновесие характеризуется константой равновесия.

В общем виде константа равновесия реакции записывается так:

$$K_a = \prod a_i^{\nu_i}, \text{ где}$$

$a_i$  – активности реагентов, взятые в стехиометрических соотношениях;

$\nu_i$  – стехиометрические коэффициенты (как обычно, для исходных веществ принимаются отрицательными, для продуктов — положительными).

Активности чистых конденсированных фаз (твердых и жидких) принимаются равными 1, а газообразных веществ при небольших давлениях (меньше сотни атмосфер) – парциальным давлениям.

Для реакции в смеси идеальных газов константа равновесия может быть выражена через равновесные парциальные давления компонентов  $p_i$ :

$$K_p = \prod p_i^{\nu_i}$$

где  $K_p$  не зависит от исходных количеств веществ или от того, какие участники реакции были взяты в качестве исходных, но зависит от температуры.

При изучении равновесия полезно запомнить т.н. принцип Ле Шателье-Брауна: внешнее воздействие, выводящее систему из состояния равновесия, стимулирует в системе процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия. Например, при увеличении температуры скорость эндотермических реакций возрастает, а экзотермических уменьшается.

Зависимость константы равновесия реакции от температуры может быть описана уравнением изобары химической реакции:

$$d(\ln K_p) = (\Delta H / RT^2) dT$$

$\Delta H$  – тепловой эффект реакции, протекающей при постоянном давлении. Если  $\Delta H > 0$  (тепловой эффект положителен, реакция эндотермическая), то температурный коэффициент константы равновесия тоже положителен, то есть с ростом температуры константа равновесия эндотермической реакции увеличивается, равновесие сдвигается вправо. Если  $\Delta H < 0$ , то константа равновесия с ростом температуры для экзотермической реакции уменьшается, равновесие сдвигается влево (что вполне согласуется с принципом Ле Шателье-Брауна).

По результатам исследований предложены две схемы комплексной переработки торфа:

1. Гибкая технология переработки торфа

Схема технологического переработки торфа представлена на рис. 1.9.

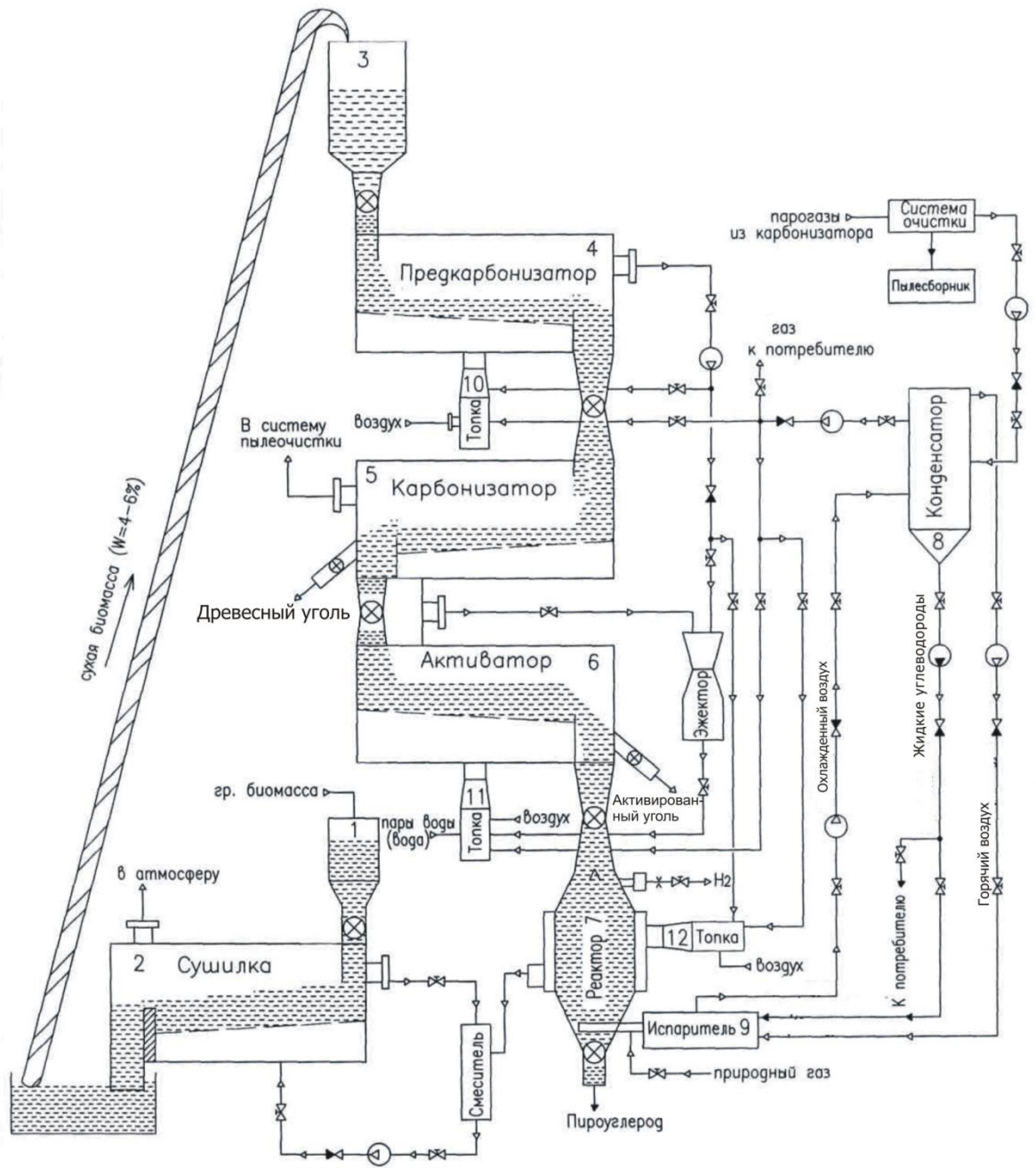


Рисунок 1.9 – Схема технологического процесса переработки торфа

Достоинством этой схемы является гибкость по конечным целевым продуктам, отказ или сокращение использования природных невозобновляемых источников углеводородов, а также сокращение выбросов в атмосферу парникового углекислого газа при производстве технического водорода по сравнению с традиционными способами его производства.

## 2. Получение углеродного материала

Схема технологического процесса получения углеродного материала представлена на рис. 1.10.

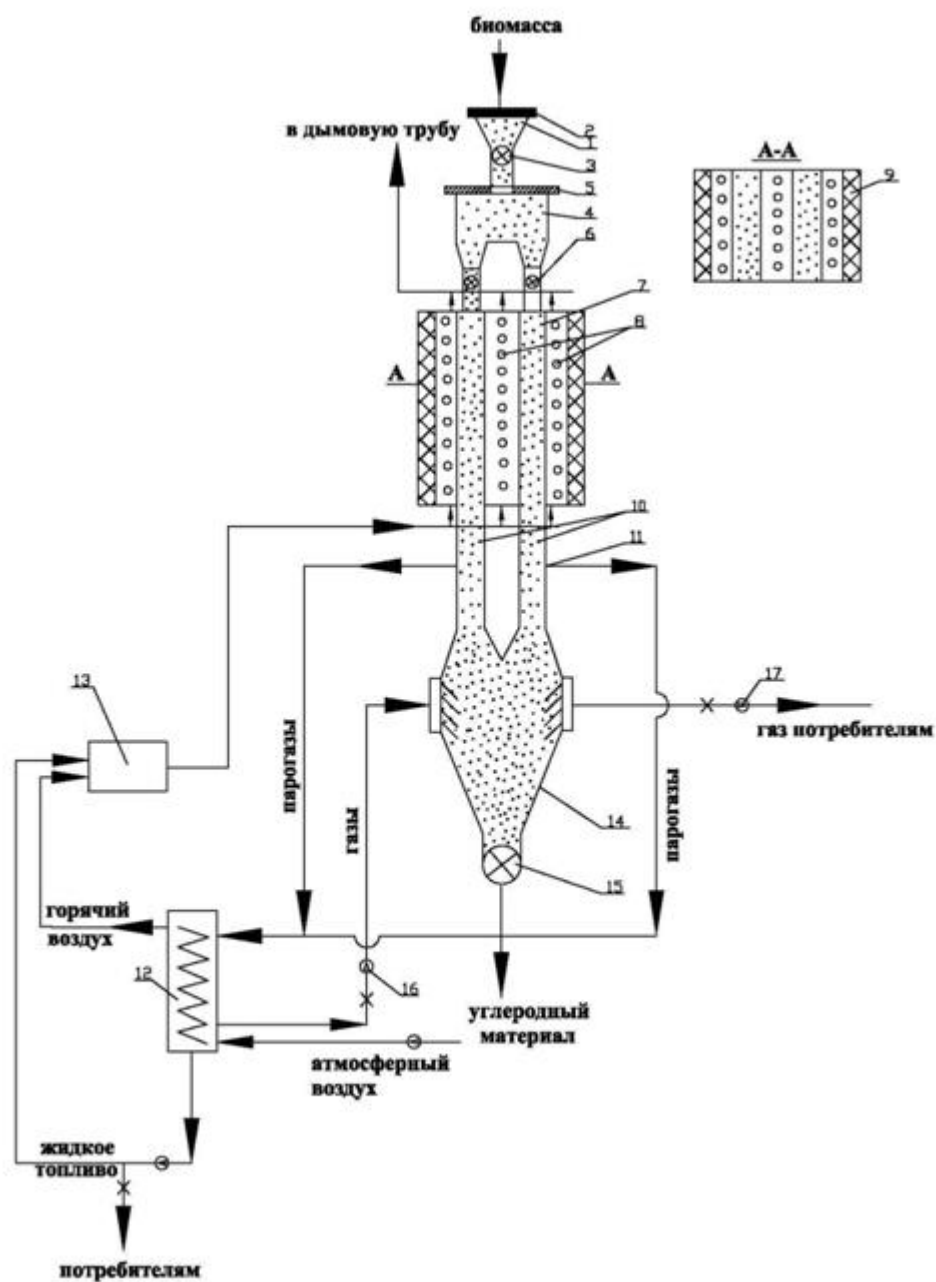


Рисунок 1.10 –Схема технологии процесса получения углеродного материала

Достоинством предлагаемой схемы являются высокая калорийность топлива, непрерывность технологического процесса и возможность регулирования получения кокса или активного угля.

В соответствии с техническим заданием был разработан технологический регламент производства высококалорийного энергетического топлива, кокса с заданными прочностными характеристиками и АУ с заданными сорбционными свойствами из торфа. Технологический регламент включает в себя подробное рассмотрение характеристик сырья и получаемой продукции, описание технологического процесса, технологическую схему установки, контроль ведения технологического процесса. Рассмотрены вопросы промышленной и экологической безопасности.

В процессе выполнения 1 этапа НИР получены следующие основные результаты:

1. Проведен аналитический обзор информационных источников по ресурсным базам торфа в России, существующих технологий переработки торфа.

При этом были получены следующие результаты.

– В ряду горючих ископаемых торф по теплоте сгорания занимает место между бурными углями и дровами.

– Стоимость тепла, вырабатываемого на торфяном топливе в котельных ЖКХ, в два раза ниже по сравнению с теплом, вырабатываемым с использованием каменного угля.

– В настоящее время в торфяной отрасли действует около 90 предприятий и организаций, а также большое количество торфоперерабатывающих цехов, расположенных в Европейской части страны, Сибири и на Дальнем Востоке.

– Перспектива торфяной отрасли заключается в повышении степени переработки торфа на основе современных технологий.

– Другим перспективным направлением является разработка технологии и оборудования для производства торфяных гранул и торфяного кокса.

– В настоящее время в России отсутствует широкомасштабное производство современного оборудования для газификации и пиролиза торфа, производства торфяного кокса, активного угля и приготовления

торфяных гранул. Зарубежное оборудование чрезмерно дорого и по ряду параметров не соответствует российским условиям.

2. Определены перспективные направления комплексной технологии переработки торфа.

– Котельные, работающие на традиционных видах топлива (уголь, мазут, газ) необходимо и экономически оправданно перевести на местные виды топлива. С этой целью необходимо создание и тиражирование современных котлов, работающих в автоматическом режиме на генераторном газе (продукт газификации торфа) либо на торфяных гранулах (продукт первичной переработки торфа). Следует добавить, что помимо использования в местных котельных торфяные гранулы, удовлетворяющие требованиям евростандартов, являются продуктом экспорта, не уступающим по конкурентоспособности углю и жидкому топливу.

– В настоящее время в стране отсутствует производство современного оборудования для газификации торфа и приготовления торфяных гранул. Зарубежное оборудование чрезмерно дорого и по ряду параметров не соответствует российским условиям. Совершенно очевидно, что требуется разработка собственных технологий и собственного оборудования.

– Перспективным является разработка технологий и оборудования для производства торфяного металлургического кокса. К настоящему времени запасы коксующихся углей в России истощаются, а потребность в металлургическом коксе велика. У нас в стране имеются большие запасы торфа, пригодного для производства кокса.

– Производство активных углей из кокса находится как у нас в стране, так и за рубежом в начальной стадии развития. Между тем, разнообразие торфов и их свойств позволяет получать качественные и дешевые активные угли.

3. Разработана программа и методика экспериментальных исследований по переработке нового процесса комплексной переработки

торфа с получением твердого высококалорийного топлива, активированного угля и кокса

4. Проведено математическое моделирование процессов карбонизации торфа с получением высококалорийного топлива, кокса, процесса упрочнения кокса и активации продуктов карбонизации с получением АУ, в т.ч.:

– Разработана математическая модель пиролиза крупных частиц торфа. В качестве кинетической схемы выбраны схемы с брутто-реакциями без детальной кинетики. Выбраны основные константы модели. Проведены оценочные расчеты по разработанной модели в широком диапазоне температур.

– Расчеты показали, что увеличение характерного размера пиролизуемых частиц более 0,01 м приводит к существенному увеличению времени пиролиза, что связано со сдвигом процесса в диффузионную область. Время пиролиза частиц радиуса 0,01 м составляет 1 ч при температуре окружающей среды 573 К.

– Сопоставление результатов численного моделирования процесса карбонизации торфа и процесса получения пироуглерода с соответствующими экспериментальными данными, полученными на макетных установках, показали адекватность разработанных математических моделей. В целом достигнуто как качественное, так и количественное согласие по основным параметрам процессов. Полученное согласие дает возможность использовать разработанные математические модели для более детального исследования (зачастую недоступного в эксперименте) и понимания процессов, происходящих в реакционной зоне.

– Получены основные энергетические и массовые характеристики различных процессов переработки торфа (карбонизация, пиролиз, крекинг).

– В приближении одноканальной модели, в которой деструкция летучих описывается одной брутто-реакцией, константа скорости которой



представлена в аррениусовском виде, рассчитаны кинетические параметры (энергия активации, предэкспоненциальный множитель и порядок реакции), характеризующие процесс деструкции летучих при их взаимодействии с углеродной поверхностью.

5. Разработана эскизная конструкторская документация на экспериментальную установку

6. Разработаны теоретические основы функционирования экспериментальной установки по комплексной переработке торфа

Теоретические основы можно сформулировать в следующих положениях.

– Для поддержания неравновесного состояния реакций конверсии торфа в целевые продукты необходимо поддерживать градиент температур в слое частиц торфа, не равный нулю.

– При производстве активированного угля из торфа активирующие газы ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) должны иметь температуру выше 1000К.

– Для производства кокса желательно в зоне коксования иметь минимальную концентрацию водорода, т.к. водород занимает свободные валентности активных радикалов и предотвращает конденсацию полиядерных ароматических структур, образующих кокс.

– При одновременном производстве кокса и активного угля желательно производить эти продукты в отдельных аппаратах: карбонизаторе (кокс) и активаторе (активный уголь). При этом часть материала из активатора выводится из процесса в виде кокса, а остальное подается в активатор для получения активного угля.

7. Разработаны схемные решения по реализации результатов теоретических исследований.

По результатам теоретических исследований разработаны принципиальные технологические схемы, при реализации которых возможно получать желаемые продукты из торфа:

– Гибкая технология переработки торфа–достоинством этой схемы является гибкость по конечным целевым продуктам, отказ или сокращение использования природных невозобновляемых источников углеводородов, а также сокращение выбросов в атмосферу парникового углекислого газа при производстве технического водорода по сравнению с традиционными способами его производства.

– Получение углеродного материала–достоинством предлагаемой схемы являются высокая калорийность топлива, непрерывность технологического процесса и возможность регулирования получения кокса или активного угля.

8. Разработан технологический регламент производства высококалорийного энергетического топлива, кокса с заданными характеристиками и АУ с заданными сорбционными свойствами из торфа

В соответствии с техническим заданием к государственному контракту № 16.516.11.6130 был разработан технологический регламент производства высококалорийного энергетического топлива, кокса с заданными прочностными характеристиками и АУ с заданными сорбционными свойствами из торфа. Технологический регламент включает в себя подробное рассмотрение характеристик сырья и получаемой продукции, описание технологического процесса, технологическую схему установки, контроль ведения технологического процесса. Рассмотрены вопросы промышленной и экологической безопасности.

### **1.2 Обобщение работ по 2 этапу**

В процессе выполнения 2 этапа государственного контракта разработана Программная документация по реализации результатов теоретических исследований, проведена комплектация экспериментальной установки стандартизированным оборудованием, выполнены монтажные и пуско-наладочные работы экспериментальной установки.

На сегодняшний день имеется широкий спектр инструментов для создания приложений для Windows. Одним из самых продуктивных

средств для этих целей является Delphi. Достигается это за счет нескольких факторов:

- качество визуальной среды разработки;
- скорость работы компилятора и быстродействием откомпилированных программ;
- мощность языка программирования и его сложность;
- гибкость и масштабируемость используемой архитектуры баз данных;
- наличие поддерживаемых средой разработки шаблонов проектирования и использования;

При моделировании задач процессов карбонизации торфа с получением высококалорийного топлива, кокса, процесса упрочнения кокса и активации продуктов карбонизации с получением АУ наиболее часто используются методы, где в качестве основы используются алгоритмы подобные SIMPLE.

В рамках государственного контракта создается экспериментальная установка для исследования технологии комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей. Для ее изготовления совместно с ООО «Малые газопоршневые ТЭС» были разработаны экспериментальные модули из стандартизированного оборудования для исследования характеристик комплексной технологии переработки торфа:

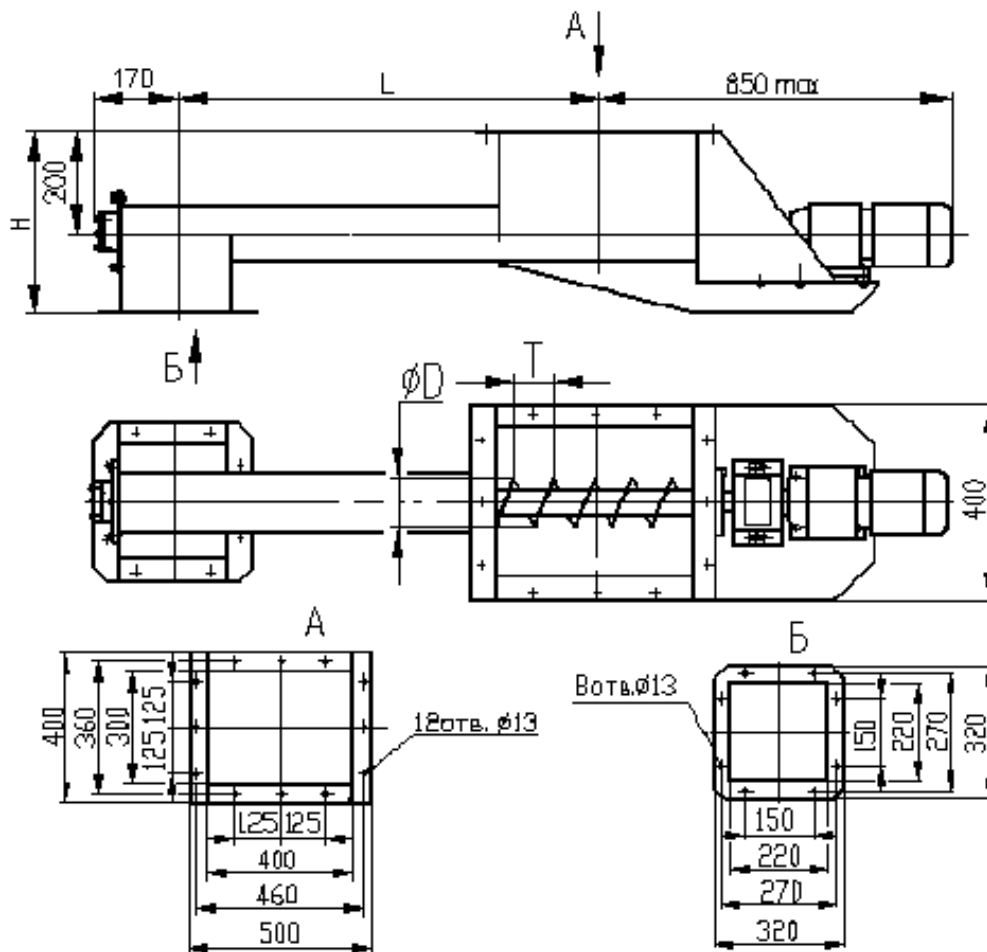
- модуль дозирования и разгрузки
- модуль дегидратации
- пусковая горелка
- рабочая горелка

Установка комплексной переработки торфа состоит из нескольких основных экспериментальных модулей: модуль дозирования и разгрузки, модуль дегидратации, модуль карбонизации и модуль активации. Все три

модуля однотипны, имеют похожие конструкции, что ускоряет их изготовление, упрощает монтаж и пуско-наладочные работы. Отличие заключается в режимных параметрах: расходных и температурных. Все модули монтируются в одном реакторном блоке. Блок футеруется.

Основные монтажные операции:

- монтаж и установка дозатора и разгрузчика. Габаритно-установочные размеры показаны на рис. 1.11.
- футеровочные работы в соответствии с приведенной ниже инструкцией.



Обозначение	Производитель оборудования, М/час	$P_2$ , кВт/мин	$D$ , мм	$T$ , мм	$L^*$ , мм	$H$ , мм	Номинальная мощность прибора, кВт	Масса, кг	Примечание
ДШ-100	0,25	21,0	100	80	1950	360	0,12 - 1,1	100-200	* Размер $L$ , кратный 150 мм, определяется расстоянием перегибания материала
	0,40	35,5							
	0,63	50,0							
	1,00	80,0							
	1,5	125,0							

Тип и мощность прибора определяет изготовитель.

Рисунок 1.11 - Габаритно-установочные размеры модуля дозирования и разгрузки

Дозатор (разгрузатель) объемного дозирования одношнековый ДШ-100/80 – 2 шт.

максимальная производительность	0,25 м <sup>3</sup> /час
минимальная производительность	0,015 м <sup>3</sup> /час
мощность привода	0,5 кВт
производство ф. "АГРОЭСКОРТ" (С-Петербург)	
габаритно-установочные размеры	см. рис. 1.11

Футеровка должна производиться в такой последовательности:

- приготовление химически стойких мертелей (растворов);
- футеровка строительных конструкций;
- сушка футеровки;
- окисловка (при необходимости) швов.

Нанесение составов, имеющих кислые отвердители, на бетонную или стальную поверхности не допускается.

Облицовочные и футеровочные штучные материалы (кирпичи) должны быть отсортированы и подобраны по размерам. Не допускается применять закислованные и замасленные материалы.

Перед футеровкой на битумных и полимерных составах штучные материалы должны быть огрунтованы по граням и с тыльной стороны соответствующими грунтовками.

Число слоев футеровки или облицовки и вид химически стойких замазок (растворов) указывают в проекте.

Ширина швов при футеровке на кислотостойких растворах: для кирпича - 6 мм.

Конструктивные размеры прослоек и швов при футеровке технологического оборудования штучными материалами на различных химически стойких замазках (растворах) приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Конструктивные размеры прослоек и швов при футеровке технологического оборудования

Вид работы	Материал	Толщина прослойки, мм	Ширина шва, мм
1. Футеровка на химически стойких силикатных замазках, в том числе комбинированным способом	Кирпич	10	5
	Плитка керамическая (прямая и фасонная), шлакоситалловая	8	3
2. То же, с разделкой швов при футеровке впустошовку	Кирпич	10	8
	Плитка керамическая, шлакоситалловая	8	5
3. Футеровка на цементно-песчаном растворе, в том числе комбинированным способом	Кирпич	15	8
	Плитка керамическая (прямая, фасонная), шлакоситалловая	15	3
4. То же, с разделкой швов при футеровке впустошовку	Кирпич	15	8
	Плитка керамическая, шлакоситалловая	15	5
5. Футеровка на замазках арзамит, эпоксидной и др. на основе органических смол	Кирпич, блоки	5	5
	углеграфитированные Плитка керамическая (прямая, фасонная), шлакоситалловая	3	3

Футеровка штучными изделиями на химически стойких силикатных замазках и цементно-песчаных растворах в зависимости от требований проекта может выполняться с заполнением швов одним составом, впустошовку с последующей разделкой швов или комбинированным способом с одновременным нанесением кислотоупорной силикатной замазки или цементно-песчаного раствора и полимерной замазки. Заполнение швов между штучными кислотоупорными материалами должно осуществляться выдавливанием замазки (раствора) с одновременным удалением выступившей части замазки (раствора).

Сушку футеровки следует выполнять послойно в соответствии с технологическими инструкциями.

Футеровку оборудования производят с перевязкой швов.

Оборудование и сборные части цилиндрических газоходов и трубопроводов допускается футеровать кислотоупорными штучными изделиями до их монтажа, при этом должен быть произведен дополнительный расчет указанных конструкций на монтажные нагрузки.

При футеровке аппаратов с коническими днищами кирпич укладывают кольцами, начиная от центра конуса и постоянно приближаясь к стенкам аппарата, чередуя прямой и клиновой кирпичи.

Главные задачи пуско-наладочных работ:

- 1) Обеспечить неразрывность движения твердого материала, начиная от объемного расхода гранул исходного торфа до расхода разгрузчика на выходе.
- 2) Определить оптимальный теплотехнологический режим для получения целевых продуктов.
- 3) Обеспечить возможность установления требуемой температуры термообработки, которая регулируется расходом топлива в горелке.

Для обеспечения непрерывности (неразрывности) движения материала необходимо выполнить правильный монтаж и установить дозатор и разгрузчик и провести их тарировку, выполнить и передать эксплуатационному персоналу тарировочный график.

Тарировка выполняется в следующей последовательности:

- 1) Вывести установку на рабочий режим, обеспечивающий заданные программой испытаний температурные параметры в аппаратах дегидратации, карбонизации и активации, начиная с максимальной температуры (в аппарате активации)  $1000^{\circ}\text{C}$ .

- 2) В течение двух часов фиксировать массовый расход через верхний дозатор-загрузчик. Через определенный промежуток времени, равный времени пребывания материала в установке, изменять расход от максимального 20 кг/ч до минимального 5 кг/ч.

- 3) Время пребывания материала в установке определяется примешиванием к частицам торфа частиц ангидрита ( $\text{CaSO}_4$ ). Ангидрит не разлагается и не меняет состава до температур, значительно превышающих максимальные температуры в исследуемой установке. На выходе частицы ангидрита необходимо выделить из черной массы активного угля или

кокса. Время нахождения частиц ангидрита принимается за время нахождения частиц торфа (кокса или АУ) в установке.

Фиксировать расход материала через разгрузчик.

- 4) Расход на выходе через разгрузчик должен быть 40...50% расхода на входе (в режиме получения твердого топлива и кокса) и 10...20% в режиме получения активного угля.
- 5) По полученным точкам строится тарировочный график, в котором по оси ординат наносятся точки расхода на выходе, по оси абсцисс – точки расхода на входе.
- 6) Наладочные работы повторяются для максимальной температуры 800 и 900<sup>0</sup>С. Для каждой температуры строится тарировочный график.
- 7) По результатам испытаний выбирается оптимальный режим и оптимальный расход торфа, который должен быть не менее 10 кг/ч в соответствии с техническим заданием.

Задание температур в аппаратах установки

1) Принимается, что температура твердого материала на выходе отличается от температуры газа на выходе на пренебрежимо малую величину. Поэтому максимальная температура термообработки измеряется температурой отходящих газов на исследуемой стадии термообработки.

Пусковая горелка предназначена для пуска установки на природном газе в качестве топлива, рабочая обеспечивает температурные режимы на синтез-газе, получаемом при карбонизации и активации торфа.

В процессе выполнения НИР по 2 этапу получены следующие основные результаты:

1. Разработана программная документация по реализации результатов теоретических исследований

Изложены общие подходы к построению приложений с использованием принципов объектно-ориентированного программирования. Дана структура разработанных классов-моделей,



классов и компонентов для визуализации полученных результатов, приведен программный комплекс для моделирования процессов карбонизации торфа с получением высококалорийного топлива, кокса, процесса упрочнения кокса и активации продуктов карбонизации с получением АУ.

2. Произведена комплектация экспериментальной установки стандартизированным оборудованием:

- модуль дозирования и разгрузки
- модуль дегидратации
- пусковая горелка
- рабочая горелка

3. Проведены монтажные и пуско-наладочные работы экспериментальной установки

### **1.3 Обобщение работ по 3 этапу**

В процессе выполнения 3 этапа государственного контракта проведена комплектация экспериментальной установки не стандартизированным оборудованием, проведены экспериментальные исследования установки, по результатам исследования проведена корректировка эскизной документации, доработана экспериментальная установка и математическая модель, выполнены монтажные и пуско-наладочные работы экспериментальной установки

В рамках государственного контракта № 16.516.11.6130 от 20 сентября 2011 г. создается экспериментальная установка для исследования технологии комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей. Для изготовления экспериментальной установки были разработаны экспериментальные аппараты не стандартизированного оборудования для исследования характеристик комплексной технологии переработки торфа:

- сушильный аппарат

- аппарат предкарбонизации
- аппарат карбонизации
- аппарат активации

Главной задачей пуско-наладочных работ является определение параметров псевдоожижения, обеспечивающих устойчивый режим без газовых пузырей и выноса частиц. Частицы торфа представляют собой цилиндры (пеллеты), характеристики которых приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Характеристики гранул

<b>Наименование характеристики</b>	<b>Гранулы из торфа (пеллеты)</b>
Диаметр, мм	7,0
Отношение диаметра гранулы к средней длине d/l	0,59
Плотность гранулы $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1100
Порозность слоя в состоянии минимального псевдоожижения	0,59

Перепад давления в слое и его пульсации измерялись дифференциальным микроманометром Testo 525. Скорость газов измерялась на выходе из аппарата термоанемометром типа Testo 405-VI.

Опыты проводились при высоте неподвижного слоя 210 – 230 мм. Каждый опыт повторялся 5 раз.

В ходе предварительных опытов было установлено, что без уменьшения точности измерения более, чем на 10 %, измерения пульсации перепада давления надо производить через каждые 0,05 с. в течение 60 с.

Полученные при пуско-наладочных работах обобщенные критериальные зависимости могут быть использованы в работах по конструированию опытно-промышленных установок комплексной переработки торфа.

Разрабатываемая комплексная технология термохимической переработки торфа является гибкой по конечным целевым продуктам: коксу, твердому топливу, активному углю с энергетическим самообеспечением. Возможно одновременное или отдельное производство указанных продуктов.

На рис.1.12 представлена упрощенная принципиальная технологическая схема установки, на которой были выполнены экспериментальные исследования. Программа исследований была разработана и утверждена в процессе выполнения работ по этапу 2.

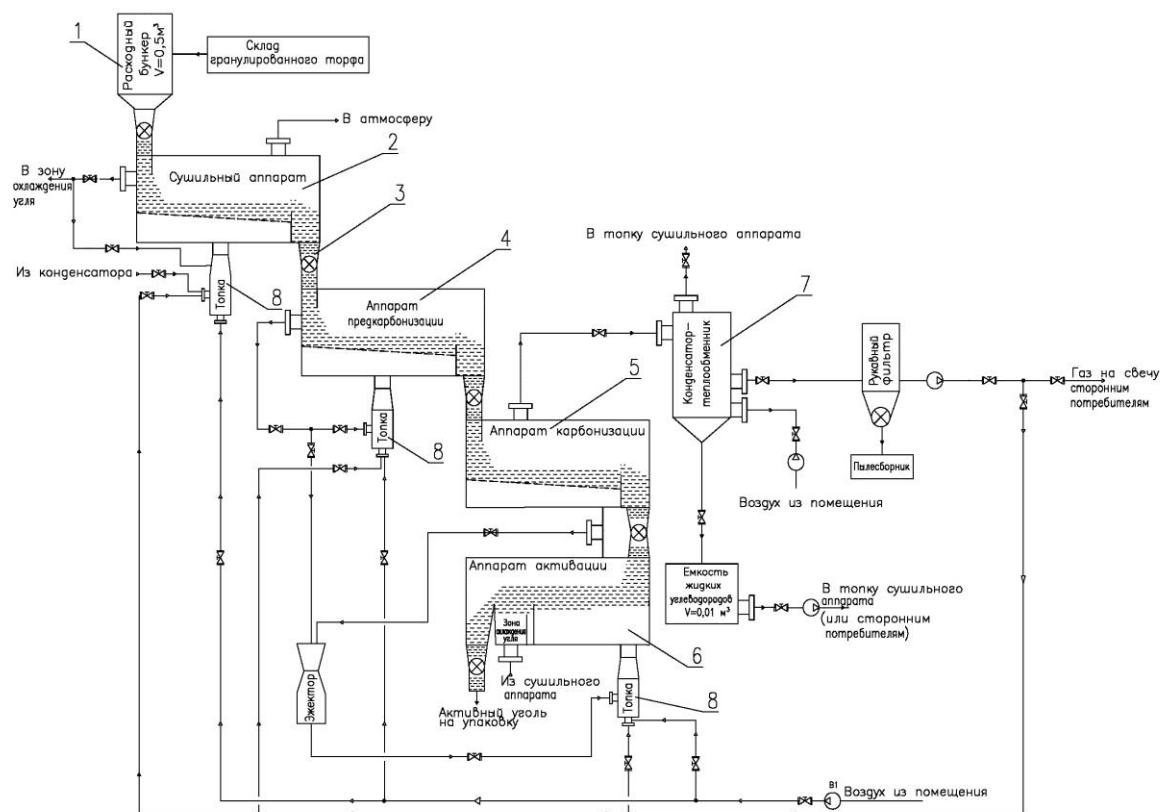


Рисунок 1.12 - Принципиальная технологическая схема исследовательской установки комплексной переработки торфа

Гранулированный торф из расходного бункера 1 подается в сушилку 2, из нее в расходный бункер 3 аппарата дегидратации. Из дегидрататора 4 (предкарбонизатора) материал с температурой  $280...320^{\circ}C$  через шлюзовую затвор поступает в карбонизатор 5, а из него в активатор 6. В аппарате дегидратации из торфа выделяются пары физически и химически

связанной воды, монооксид водорода  $\text{CO}$ , диоксид  $\text{CO}_2$ , небольшое количество водорода, а также пары конденсирующихся веществ. В карбонизаторе выделяется основное количество горючих неконденсирующихся газов  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , а также паров смолистых веществ и подсмольная вода. Парогазы из карбонизатора направляются в конденсатор-охладитель 7, в котором конденсируются смолистые вещества и вода. Охлажденные горючие газы пиролиза (карбонизации) направляются в топки 8 сушильного аппарата, предкарбонизатора и активатора, а жидкие вещества («пиролизное масло») – в топку активатора. Нагретый воздух из активатора подается на горение в топки.

Одной из задач экспериментальных исследований было исследование влияния режимных и конструктивных параметров на распределение вещества и энергии в различных фазах (твердая, жидкая, газообразная), образующихся в процессе термохимической обработки торфа. Исследования проводились при различных температурах в предкарбонизаторе и карбонизаторе. По результатам исследований была разработана программа расчета материального и энергетического балансов при различных температурах термохимической переработки торфа.

Исследования выполнялись в непрерывном режиме 32 часов (четыре смены). В процессе испытаний выполнялись следующие технологические режимы:

1. Номинальный режим, соответствующий программе испытаний (16 часов):

Производительность по исходному торфу – 10 кг/ч

Температура в аппарате дегидратации –  $380^\circ\text{C}$ ;

Температура в аппарате карбонизации –  $700^\circ\text{C}$ ;

Температура в аппарате активации –  $980^\circ\text{C}$ ;

2. Форсированный режим (16 часов):

Производительность по исходному торфу – 12 кг/ч

Температура в аппарате дегидратации –  $380^\circ\text{C}$ ;

Температура в аппарате карбонизации – 800°C;

Температура в аппарате активации – 1000°C

В таблицах 1.4 и 1.5 представлены средние показатели процесса в номинальном и форсированном режимах.

Таблица 1.4 - Средние основные показатели, полученные в исследовательских испытаниях при номинальном режиме

№.№пп	Наименование	Размерность	Величина	Примечания
1.	Производительность по исходному торфу	кг/ч	10,1	Максимум 10,3; минимум 9,8
2.	Производительность по активному углю	кг/ч	1,3	Максимум 1,5; минимум 0,85
3.	Производительность по коксу (твердому топливу)	кг/ч	3,3	
4.	Количество неконденсирующихся газов	нм <sup>3</sup> /кг торфа	0,16	
5.	Состав газов из конденсатора: СО Н <sub>2</sub> СО <sub>2</sub> СН <sub>4</sub> Жидкость	% по объему    кг/кг торфа	 29,7 23,1 21,7 25,5 0,449	Анализ на комплексе “Хроматэк Кристалл 5000.1”
6.	Теплотворная способность газов	МДж/нм <sup>3</sup>	15,580	
8.	Теплотворная способность твердого топлива (кокса)	МДж/кг	27,250	
9.	Предел прочности на сжатие кокса	МПа	15,5	
10.	Содержание углерода в коксе	%%	94,3	В расчете на беззольное вещество
11.	Содержание серы и фосфора в коксе	%%	0,01	Фосфор-следы
12.	Йодное число получаемых активных углей	мг/г	840	

Таблица 1.5 - Средние за смену основные показатели, полученные в форсированном режиме

№№пп	Наименование	Размерность	Величина	Примечания
1.	Производительность по исходному торфу	кг/ч	12,0	Максимум 12,3; минимум 11,5
2.	Производительность по активному углю	кг/ч	1,5	Максимум 1,7; минимум 1,35
3.	Производительность по коксу (твердому топливу)	кг/ч	4,2	
4.	Количество неконденсирующихся газов	нм <sup>3</sup> /кг торфа	0,2	
5.	Состав газов из конденсатора: СО Н <sub>2</sub> СО <sub>2</sub> СН <sub>4</sub> Жидкость	% по объему    кг/кг торфа	 26,2 52 4,5 17,3 0,433	Анализ на комплексе “Хроматэк Кристалл 5000.1”
6.	Теплотворная способность газов	МДж/нм <sup>3</sup>	15,45	
8.	Теплотворная способность твердого топлива (кокса)	МДж/кг	29,27	
9.	Предел прочности на сжатие кокса	МПа	17,2	
10.	Содержание углерода в коксе	%%	96,2	В расчете на беззольное вещество
11.	Содержание серы и фосфора в коксе	%%	Сера 0.01	Фосфор-следы
12.	Йодное число получаемых активных углей	мг/г	950	

Из результатов экспериментов и сопоставления основных показателей двух режимов можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении максимальной температуры в карбонизаторе и активаторе увеличиваются нижеследующие показатели:

– повышается объем неконденсирующихся газов и уменьшается их теплотворная способность. Объем увеличивается вследствие реакции конверсии метана водяным паром  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ . Водяной пар образуется при испарении подсмольной воды. Из двух объемов исходных веществ получаются четыре объема продуктов. Эта реакция является также причиной некоторого уменьшения теплотворной способности неконденсирующихся газов.

– Повышается предел прочности кокса на сжатие и увеличивается его теплотворная способность как топлива. При высокой температуре происходит прокалка твердого остатка карбонизации.

– Увеличивается адсорбционная способность активного угля. Причиной является повышение скорости реакции активирующих газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с углеродом твердого углеродистого остатка и увеличение пористости последнего по реакциям  $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$  и  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ . В угле образуется разветвленная система мезо- и микропор.

2. Для повышения показателей качества целевых продуктов целесообразно не увеличивать и далее температуру в активаторе и карбонизаторе, а увеличивать время пребывания частиц (время термообработки) в этих аппаратах установки.

3. Результаты эксперимента показали, что для более эффективной работы установки необходимо изменить теплообменный аппарат и коэффициент избытка воздуха в топке аппарата активации.

По результатам испытаний для повышения качества целевых продуктов необходимо увеличить температуру в активаторе и карбонизаторе. Но с точки зрения тепловых и энергетических затрат это не целесообразно. Наилучший вариант решения этой проблемы – увеличить время пребывания материала в аппаратах. Для этого необходимо изменить

конструкцию аппаратов, а именно увеличить высоту перегородки, которая обеспечивает расчетное время пребывания торфяных частиц. Высота слоя в аппарате карбонизации увеличена до 320мм. Высота слоя в аппарате карбонизации увеличена до 290мм.

По результатам испытаний было принято решение изменения конденсатора-теплообменника. Температура охлаждающих газов для лучшей работы установки должна быть 110°С. Для этого в теплообменнике увеличивается поверхность теплообмена. Также увеличивается расход воздуха из помещения с 22м<sup>3</sup>/ч до 30м<sup>3</sup>/ч. Для этого вентилятор радиальный высокого давления взрывозащищенный G=10..25 м<sup>3</sup>/ч, P=2700..2900 Па заменяется аналогичный вентилятором с расходом G=20..35м<sup>3</sup>/ч.

Для изменения коэффициента избытка воздуха в топке аппарата активации шаровым регулирующим клапаном расход воздуха из помещения снижается с 3м<sup>3</sup>/ч до 2,5 м<sup>3</sup>/ч.

Это не влияет на полноту сгорания топлива, но приводит к улучшению показателей активированного угля при выходе из установки.

После изменения конструкции аппаратов и доработки установки были выполнены исследовательские испытания установки в течение 8 часов при выходе на рабочий стационарный режим.

Показатели стационарного режима:

Производительность по исходному торфу – 12 кг/ч

Температура в аппарате дегидратации – 380°С;

Температура в аппарате карбонизации – 800°С;

Температура в аппарате активации – 1000°С;

В таблице 1.6 представлены средние основные теплотехнические показатели в стационарном режиме на доработанной экспериментальной установке.



Таблица 1.6 - Средние за смену основные показатели, полученные в форсированном режиме

№.№пп	Наименование	Размерность	Величина	Примечания
1.	Производительность по исходному торфу	кг/ч	11,8	Максимум 12,3; минимум 11,5
2.	Производительность по активному углю	кг/ч	1,45	Максимум 1,7; минимум 1,35
3.	Производительность по коксу (твердому топливу)	кг/ч	4,25	
4.	Количество неконденсирующихся газов	нм3/кг торфа	0,21	
5.	Состав газов из конденсатора: СО Н2 СО2 СН4 Жидкость	% по объему    кг/кг торфа	 27,1 53,4 3,9 18,23 0,423	Анализ на комплексе "Хроматэк Кристалл 5000.1"
6.	Теплотворная способность газов	МДж/нм3	16,07	
8.	Теплотворная способность твердого топлива (кокса)	МДж/кг	30,11	
9.	Предел прочности на сжатие кокса	МПа	18,1	
10.	Содержание углерода в коксе	%%	98	В расчете на беззольное вещество
11.	Содержание серы и фосфора в коксе	%%	0.01	Фосфор-следы
12.	Йодное число получаемых активных углей	мг/г	985	

Ниже представлена матрица экспериментальных данных (data): 1-й столбец температура; 2-й углеродный остаток; 3-й объем неконденсирующихся газов; 4-й объемная доля метана; 5-й доля СО; 6-й доля Н<sub>2</sub>; 7-й доля СО<sub>2</sub>; 8-й другие газы (принимаем пропан).

350	.42	.014	1.3	20.1	0	78	.6
400	.4	.058	1	27.4	0	71.6	.7
500	.37	.097	15.6	33.6	2.2	39.9	1.7
600	.33	.122	16.6	40	4.4	39	0
700	.32	.157	25.5	29.7	23.1	21.7	0
800	.31	.2	17.3	26.2	52	4.5	0
900	.3	.23	8.8	20.5	62.6	3.1	0
1000	.29	.25	4.3	21.3	66.5	3.2	0

Полученные данные позволяют утверждать, что после доработки аппаратов качество продуктов улучшилось. Прочность кокса соответствует проектным требованиям. Адсорбционная способность активного угля увеличилась.

Процессы пиролиза (термической деструкции) различных органических веществ лежат в основе многих технологических процессов (получение активированного угля и т.д.). Кроме того, процессы пиролиза сопутствуют горению и газификации природных твердых топлив (уголь и т.д.).

Пиролиз органических веществ представляет собой сложный физико – химический процесс, при котором из твердого топлива происходит выделение так называемых летучих в виде газообразных и жидких продуктов: углеводородов, смол, кислот и т.д. Известно, что общее количество и состав вышедших летучих в определенной степени зависят от термических и других условий, в которых осуществляется процесс деструкции – скорости нагрева частиц, максимальной температуры и т.д.

По результатам экспериментов была проведена доработка математической модели. На рисунке 1.13 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных временных диаграмм потери массы образца в процессе ее карбонизации. Основная потеря массы за счет выхода летучих происходит за времена 580–700 мин., что соответствует температуре 250–350°C. Согласие между экспериментальными и расчетными результатами можно считать удовлетворительным.

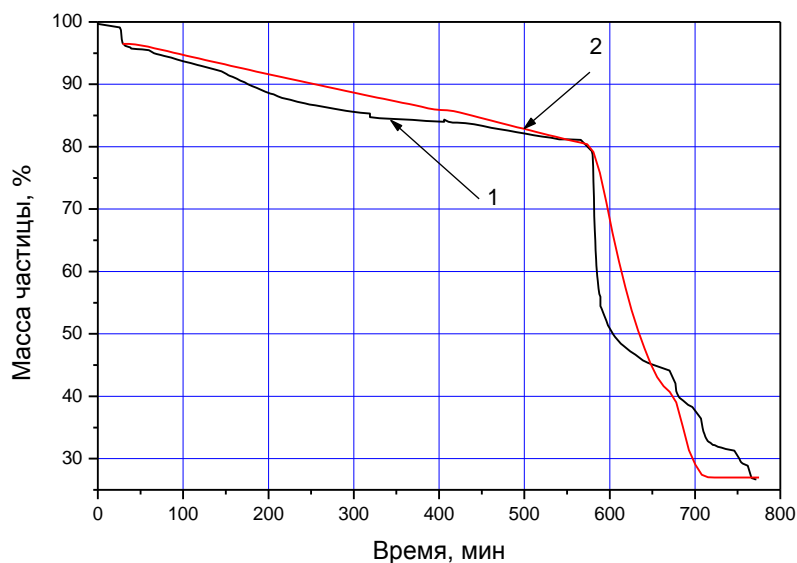


Рисунок 1.13 - Диаграмма потери массы образца органического топлива. 1 – эксперимент, 2 – расчет

Результаты расчета выхода летучих (в долях от полного выхода) в зависимости от времени представлены на рис. 1.14. Кривые 1 (выход летучих в газовой фазе внутри частицы) и 2 (летучие, вышедшие за пределы частицы) практически совпадают, что говорит о том, что скорость диффузии велика по сравнению со скоростью реакции и, следовательно, процесс карбонизации протекает в кинетическом режиме.

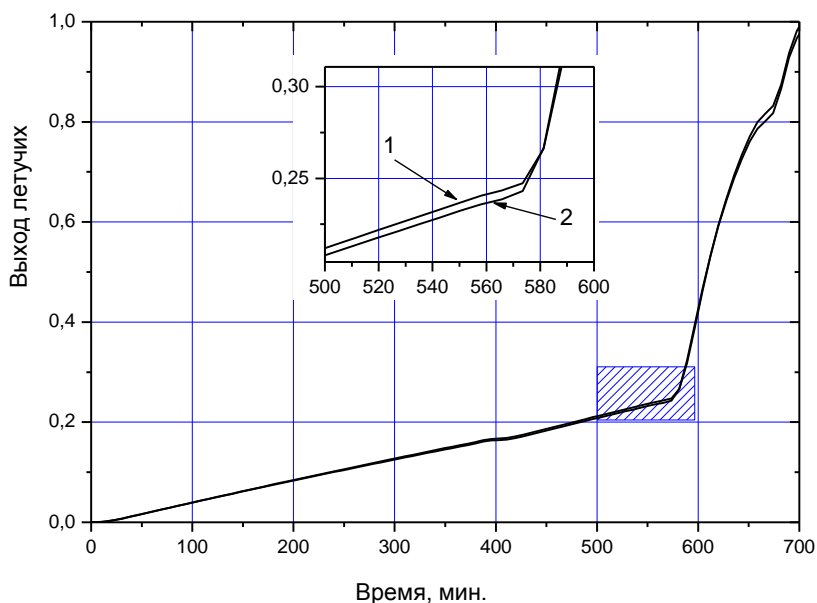


Рисунок 1.14 - Зависимость выхода летучих от времени: 1 – летучие в газовой фазе внутри частицы, 2 – летучие, покинувшие частицу

Скорость выхода летучих показана на рис. 1.15. Кривая 1 получена дифференцированием экспериментальной кривой зависимости потери массы от времени (рис. 1.14). Как видно модель правильно предсказывает начало выхода летучих. Дальнейшее расхождение расчетных и экспериментальных кривых можно объяснить тем, что в расчетах используется одноканальная модель выхода летучих, которая является достаточно грубой.

Для лучшего согласия с экспериментальными данными (см. матрицу экспериментальных данных) была разработана трехканальная модель кинетики термодеструкции торфа.

Исходные предположения, принятые при описании кинетики:

- любая биомасса, в т.ч. и торф состоит из трех компонентов: целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин;
- термодеструкция всех трех компонентов всех видов происходит по одинаковому механизму, но с различными кинетическими параметрами;
- кинетика термодеструкции всех компонентов всех видов, входящих в группу, описывается уравнением (1.8).

Разложение ОМ (органическая масса, k веществ) по трем параллельным каналам описывается уравнениями вида:

$$\frac{dX_i^k}{dt} = -a_1(i) \exp\left(-\frac{a_2(i)}{T}\right) (X_i^k)^{a_3(i)}, \quad (1.8)$$

где  $a_1(i)$ ,  $a_2(i)$ ,  $a_3(i)$  – параметры реакций ( $i=1..3$ ). – 9 параметров.

Уравнения вида (1.8) дополняются начальными условиями  $X_i^k(t=0) = a_4(i,k)$  – 3k параметров. Таким образом, для описания одного вида биомассы ( $k=1$ ) необходимо ( $9+3=12$ ) параметров. Для определения параметров необходимо решить оптимизационную задачу минимизации функционала ошибок.

В результате решения получаем для конкретного вида биомассы:

1) содержание трех компонент (лигнина, целлюлозы, гемицеллюлоз) в исходной биомассе,

2) кинетические параметры разложения по каждому из каналов (предэкспонент, энергия активации, порядок реакции).

Основное отличие модели.

Так как предполагаем, что любая биомасса состоит из трех компонентов, то для получения кинетических параметров одновременно берем  $k$  типов биомассы, для которых кинетические параметры разложения по каждому из каналов одни и те же. Т.е. рассматриваем общий функционал ошибок одновременно для  $k$  типов биомассы и минимизируем его.

В результате получаем 1) кинетические параметры разложения лигнина, целлюлозы, и гемицеллюлоз, 2) содержание этих компонентов в конкретном виде биомассы.

Т.е. находим параметры, одновременно наилучшим образом удовлетворяющие всем  $k$  типам биомассы.

В расчетах  $k=6$  (1 – пеллета из лузги подсолнечника, 2 – пеллета из шелухи риса, 3 – пеллета из соломы озимой пшеницы, 4 – торфяная пеллета, 5 – пеллета из древесины, 6 – древесина).

Параметры и результаты реакций представлены в таблицах 1.7-1.9.

Таблица 1.7 - Параметры реакций

Номер канала $i$	$a_1(i)$	$a_2(i)$	$a_3(i)$
1	0,0909	4168,88	2,244
2	179742,23	11025,89	2,559
3	2710010637,72	15934,32	1

Таблица 1.8 - Начальные условия (доли)

Номер канала $i$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$
1	0,232	0,270	0,2145	0,5884	0,181	0,188
2	0,411	0,223	0,35	0,3991	0,242	0,371

3	0,357	0,507	0,4355	0,0125	0,577	0,441
---	-------	-------	--------	--------	-------	-------

Таблица 1.9 - Параметры реакций (размерные)

Номер канала $i$	$k_0$ , 1/с	$E$ , Дж/моль	$N$
1	0,62	34643	2,244
2	2994200,57	91625	2,559
3	2710010637,72	132414	1

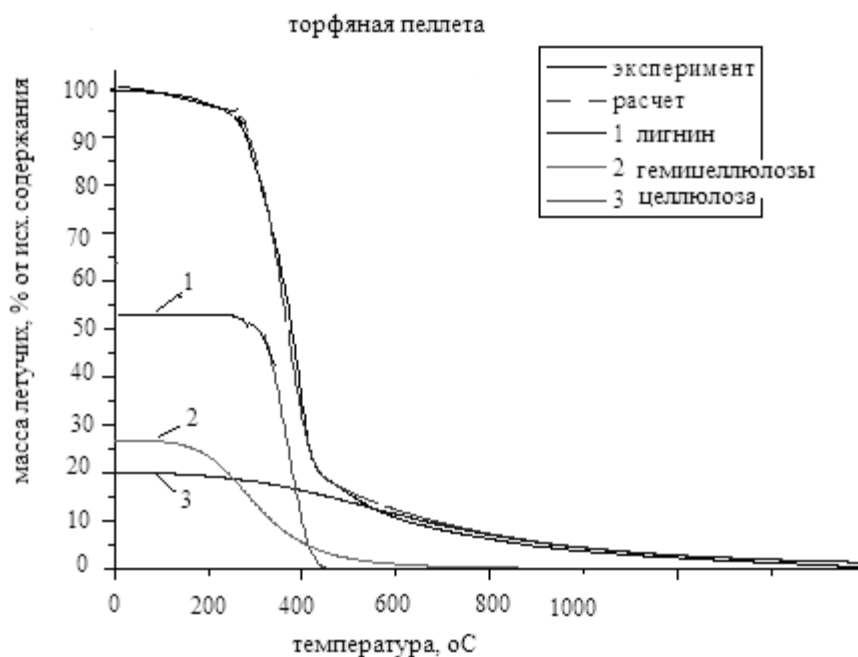


Рисунок 1.15 - Модель термодеструкции торфа по трем параллельным каналам

Трехканальная модель математического описания кинетики термохимической переработки торфа адекватно описывает экспериментальные данные, полученные в исследовательских испытаниях.

В процессе выполнения 3 этапа НИР получены следующие основные результаты:

1. Комплектация экспериментальной установки не стандартизированным оборудованием и проведение пуско-наладочных работ экспериментальной установки

В рамках выполнения 3-ого этапа НИР созданы экспериментальные модули для экспериментальной установки:

- сушильный аппарат
- аппарат предкарбонизации
- аппарат карбонизации
- аппарат активации

2. Проведение экспериментальных исследований и пуско-наладочных работ экспериментальной установки

Описан принцип действия установки, приведен расчет основных теплотехнических показателей получаемой продукции, проведены пуско-наладочные работы экспериментальной установки, были проведены исследовательские испытания.

3. Корректировка эскизной документации и доработка экспериментальной установки по результатам экспериментальных исследований.

По результатам испытаний были выявлены недостатки экспериментальной установки. Было принято решение корректировки эскизной документации и доработка экспериментальной установки. После изменения установки были проведены исследовательские испытания. Полученные данные позволяют утверждать, что после доработки аппаратов качество продуктов улучшилось.

4. Доработка математической модели по результатам сопоставительного анализа результатов, полученных по математической модели и в эксперименте.

Трехканальная модель математического описания кинетики термохимической переработки торфа адекватно описывает экспериментальные данные, полученные в исследовательских испытаниях.





## **2 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ НИР В РЕАЛЬНОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ, А ТАКЖЕ В ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКАХ.**

Созданная установка по комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей может быть применена в энергетике, химической и металлургической промышленности.

Применять созданную установку для производства торфяного металлургического кокса для выплавки чугуна (доменный кокс) как высококачественное бездымное топливо, восстановитель железной руды, разрыхлитель шихтовых материалов.

Так же созданная установка позволяет получить высококалорийный газ, который может быть использован в современных котельных, как замена природного газа.

В настоящее время активированный уголь используется во многих процессах очистки воды, пищевой промышленности, в процессах химических технологий. Кроме того, очистка отходящих газов и сточных вод основана главным образом на адсорбции активированным углем. А с развитием атомных технологий, активированный уголь является основным адсорбентом радиоактивных газов и сточных вод на атомных электростанциях. В 20 веке применение активированного угля появилось в сложных медицинских процессах, например, гемофильтрация (очищение крови на активированном угле).

Разработанный механизм математического моделирования можно рекомендовать не только для торфа, но и других видов биомассы при термохимической переработке.

Использование результатов НИР в дальнейших исследованиях и разработках:

– Экспериментальное определение тепловых эффектов реакций термохимической переработки торфа, в т.ч.:



Значение тепловых эффектов необходимы для расчета и разработки КД на установки.

– Исследование сорбционных свойств торфяного активного угля, полученного при различных теплотехнических режимах.

– Исследование химической активности торфяного кокса, полученного при различных теплотехнических режимах.

– Выполнение опытной плавки чугуна (аналог доменного процесса) с использованием торфяного кокса.

**3 ПРОЕКТ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПОСЛЕДУЮЩИХ ОКР ПО ТЕМЕ «СОЗДАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА  
УСТАНОВОК ПО КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОТХОДНОЙ  
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТОРФА С ПОЛУЧЕНИЕМ  
ВЫСОКОКАЛОРИЙНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА, КОКСА И АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ».**

На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости продолжения работ и перевода ее в стадию ОКР. Для этого необходимо разработать техническое задание на разработку типоразмерного ряда автоматизированных и механизированных установок по комплексной переработке торфа.

Целью выполнения ОКР является разработка, создание и внедрение установки по комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей производительностью 170 кг/ч по активному углю.

Назначение разработки - разрабатываемая продукция – установка предназначена для широкого использования в химической и металлургической промышленности, а также в коммунальной и промышленной энергетике. В химической промышленности используются установки для производства активного угля, в металлургии пироуглерода и кокса, в энергетике – кокс в качестве твердого топлива, в т.ч. кокс как топливо в частных домовладениях и газообразные продукты в качестве топлива.

Наименование продукции:

1 Установка по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей производительностью 170 кг/ч.

Установка должна включать сушилку исходного торфа, предкарбонизатор (дегидрататор), карбонизатор, активатор, топки

сушилки и активатора с горелочными устройствами, тяго-дутьевое и дозирующее оборудование, пылеулавливающее оборудование, диагностическую аппаратуру, средства автоматики и управления.

Установка должна быть оснащена соответствующим диагностическим оборудованием, обеспечивающим как регистрацию режимных параметров, так и определение физических и химических свойств получаемых конечных и промежуточных продуктов. Теплотворная способность твердого топлива (кокса) должна быть не менее 29,4 МДж/кг (7000 ккал/кг). Теплотворная способность газообразного топлива должна быть не менее 10,4 МДж/нм<sup>3</sup> (2500 ккал/нм<sup>3</sup>)

Проект технического задания представлен в приложении А.

## 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА

### 4.1 Распределенная (региональная) энергетика

Одним из основных сегментов рыночного потенциала при использовании результатов проекта является разработка технологии конверсии торфа в электрическую и тепловую энергию с целью создания объектов распределенной генерации на региональных топливно-энергетических ресурсах

Экономическая эффективность развития децентрализованной региональной энергетика обусловлена многими факторами, в т.ч.:

- В настоящее время согласно существующим правилам подключение новых потребителей к централизованной системе энергоснабжения происходит в соответствии с заявками на подключение потенциальных потребителей. Согласно статистическому анализу заявок на подключение в стране в целом наиболее востребованная электрическая мощность, заявляемая на подключение, составляет 0,2...0,4 МВт, а тепловая – 0,3...0,5 МВт. Максимальные заявляемые электрические мощности не превышают, как правило, 0,8...1,0 МВт, а тепловые – 1,2...1,5 МВт.

- В 2004 году энергетика смогли удовлетворить 32% заявок на подключение, в 2005 году - только 21%, в 2006 году подключили всего 16% желающих, в текущий период – уже только 10 %, т.е. 9 заявителей из десяти получают отказ на централизованное электроснабжение. В условиях жестких ограничений на подключение к централизованной энергосистеме в стране отсутствуют технологии распределенной энергетика, с помощью которых данная проблема могла бы быть решена.

- Одним из самых эффективных способов производства электроэнергии в диапазоне мощностей от нескольких десятков киловатт до одного мегаватта (как отмечалось выше, наиболее востребованный диапазон мощностей) является использование энергоагрегатов на базе

газопоршневых двигателей внутреннего сгорания, работающих в когенерационном режиме.

С экономической точки зрения наиболее выгодным для средств распределенной генерации является использование местных топлив, к которым в первую очередь относится такой распространенный ресурс как торф. На рис. 4.1 представлена карта торфонакопления на территории РФ.

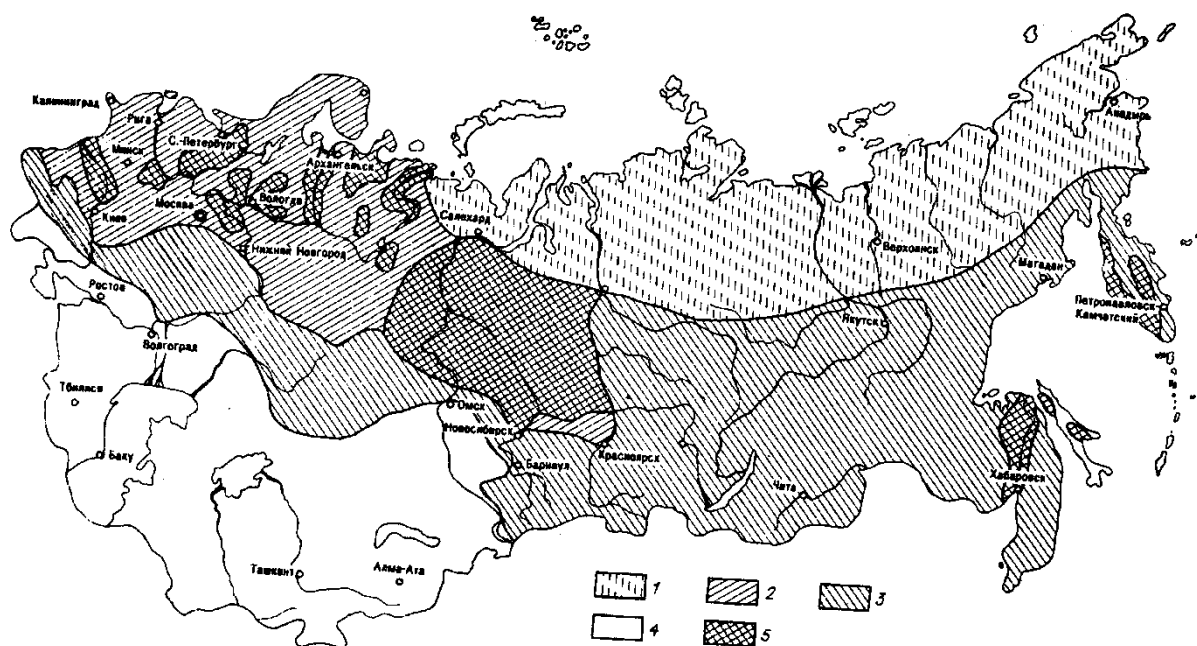


Рисунок 4.1 - Схема районирования торфяного фонда России: 1 – полярная зона торфонакопления; 2 – зона интенсивного торфонакопления; 3 – зона слабого торфонакопления; 4 – зона ничтожного торфонакопления; 5 – торфяные бассейны

Из карты видно, что месторождения торфа имеются во многих регионах России, поэтому его использование может стать широко распространенным топливом для региональной энергетики. Наша страна обладает самыми большими в мире запасами торфа. На территории РФ сосредоточено около 45% его мировых запасов. По существующим оценкам ежегодный прирост торфа в России оценивается в 260...280 млн. тонн, и только 1,1...1,2% от этого количества добывается и используется, что делает торф возобновляемым источником энергии. Ресурсы торфа в России превышают суммарные запасы нефти и газа и уступают только запасам каменного угля. Именно на подобных ресурсах должна строиться,

в основном, политика нашего государства в области возобновляемой энергетики.

Целью данного проекта является создание и внедрение энергоэффективных и энергосберегающих технологий энергетической и технологической утилизации торфа, что позволит, во-первых, модернизировать существующую систему тепло- и электрообеспечения потребителей с относительно небольшим уровнем требуемой мощности и, во-вторых, сформировать российский рынок автономных энергоустановок, работающих на местных видах топлива.

В последние десятилетия в странах с развитой экономикой значительную роль в развитии сферы энергетического производства принадлежит децентрализованным источникам энергии. Главной причиной, определяющей приоритетное развитие децентрализованной энергетики, является стремление к реализации совместной выработки электрической и тепловой энергии, что является наиболее эффективной схемой производства и распределения энергии. КПД использования топлива современных агрегатов более 90%, что приближается к максимальным требованиям по эффективности и экологической безопасности. Но тепловую энергию нельзя передавать на большие расстояния, поэтому производство тепловой энергии необходимо располагать вблизи потребителя. Если производство электрической энергии расположено на большом расстоянии от потребителя, которому необходимо также и теплоснабжение, то когенерационный цикл становится проблематичным или даже невозможным. В этом случае коэффициент использования топлива равен электрическому КПД, т.е. крайне низок. Это и диктует необходимость совместного производства электрической и тепловой энергии в непосредственной близости от потребителя, что наиболее полно может быть реализовано при децентрализованной схеме энергоснабжения на местных энергоресурсах.

В западных странах при дефиците ресурсов ископаемого топлива и в целях ослабления энергетической зависимости от стран Ближнего Востока и России, рост энергетического производства в последние два десятилетия планировался в значительной степени за счет возобновляемых источников энергии.

Традиционно западные предпочтения оказывают определенное влияние на формирование экономической политики нашего государства. В полной мере это отвисится и к энергетике. Очень часто в течение последних лет высказывалось сожаление относительно нашего отставания в области развития возобновляемой энергетики.

Недавние планы европейского сообщества относительно развития ВИЭ выглядели достаточно внушительно. И наше отставание может быть как раз тем случаем, когда отстающий оказывается в более выигрышном положении, чем тот, кто шел впереди. В нашей стране существенно иная ресурсная база, иная структура энергетического производства и распределения, иной менталитет. В этих условиях подражание «западным новациям» не всегда оказывается правильным. В России иная побудительная причина использования возобновляемых источников энергии: во-первых, огромные расстояния и наличие обширных регионов с неразвитой централизованной энергетической инфраструктурой, которую во многих случаях нецелесообразно и создавать; во-вторых – практически неисчерпаемые запасы возобновляемой растительной биомассы. В западных странах нет свободных площадей для «энергетических плантаций», поэтому получили развитие ветро- и гелиосистемы.

Использование методов возобновляемой энергетики в западных странах потребовало значительных бюджетных дотаций, необходимых для того, что бы выровнять для потребителя цены на энергию, получаемую за счет возобновляемых источников с ценами за энергию, получаемую по традиционным технологиям.



Принятие в западных странах дотационных схем при использовании новых и возобновляемых источников энергии в значительной степени оказало негативное влияние на уровень разработок в этом направлении. Если заранее известно, что разрабатываемые технические решения не должны быть конкурентоспособными по отношению к существующим, то это значительно упрощает задачу. В этом случае нет необходимости поиска новых фундаментальных закономерностей в определении параметров взаимодействия энергии и вещества, необходимых при разработке новых методов и схем получения энергии. Это проще и дешевле, чем стараться разработать что-то принципиально новое, что обеспечит качественно новый уровень по сравнению к используемыми технологиями. События последних лет показали, что целесообразность использования дотационных технологий в энергетике сомнительна.

Уровень исследований в области разработки и создания новых методов получения энергии должен обеспечивать создание технологий конкурентоспособных по отношению к технологиям, используемым в настоящее время. Нам надо не приспособливать известные на Западе технические решения, а разрабатывать те, которые могут быть экономически оправданно использованы в условиях нашей страны.

#### **4.2 Экономические приоритеты в развитии новых методов получения энергии**

Энергетика является производственной сферой. При соблюдении законов экономического развития производственная сфера должна обеспечивать поступления в бюджет, которые расходуются на непромышленные сферы: медицина, образование, социальные нужды, науку и т.д. Финансирование производственных сфер из бюджета приводит к диспропорции между доходами и расходами, наличие крупных диспропорций означает кризис, что и произошло в 2008 году. В числе прочих нарушений экономических законов являлось также и практика

бюджетного дотирования энергетической сферы. В настоящее время в западных странах повсеместно идет сокращение бюджетных расходов, что в значительной степени отражается на расстановке приоритетов в экономической сфере и, соответственно, в энергетике.

Целесообразность бюджетного дотирования энергетики, использующей новые и возобновляемые источники энергии, естественно, является проблематичной и для нашей страны. Что касается распределенной генерации и повсеместного перехода на когенерационные схемы, то это как раз та сфера, где отставание от существующего опыта не является положительным. Даже в Москве, где имеется максимальный опыт в использовании когенерационных схем, только около 50% электрической и тепловой энергии вырабатывается совместно.

Максимальное число заявок на подключение к централизованным энергосистемам приходится на мощность 200-400 кВт. При существующем уровне удельных затрат 20 - 40 тыс. руб/кВт (0,7 - 1,4 тыс.\$/кВт) на сооружение автономных газопоршневых станций с учетом выполнения проектных, монтажных работ, комплектации, выполнения пуско-наладочных работ и т.д. создание собственного энергоисточника мощностью 300 кВт электрических и 450 тепловых обойдется в 6 - 12 млн. руб. При использовании такого энергоисточника в когенерационном режиме окажется возможным еще и получение тепловой мощности порядка 0,4 Гкал/ч. Это обеспечит себестоимость электроэнергии не выше 1,8 - 2,0 руб/кВтч при себестоимости тепловой энергии – 600...800 руб./Гкал. При этом экономия инвестиций в создание энергоисточника по отношению к затратам на подключение к централизованной энергосистеме составит ~ 50 - 60 млн. руб., а экономия ежегодных затрат на электричество и тепло – 6 - 8 млн. руб.

Приведенные выше результаты оценки экономической эффективности использования децентрализованных энергоисточников на

базе газопоршневого двигателя определяют экономическую целесообразность использования децентрализованного энергоснабжения.

Газопоршневые мини-ТЭЦ обеспечивают максимальный бюджетный доход на единицу вложенных средств, а также максимальную внутреннюю норму доходности. Сооружение газопоршневых мини-ТЭЦ является максимально выгодным для инвестора и обеспечивает максимальные доходы бюджета, что в совокупности является определяющим для развития частно–государственного партнерства при их сооружении и эксплуатации. Однако в настоящее время технологии использования газопоршневых электростанций и мини-ТЭЦ для целей распределенной энергетики в нашей стране отсутствуют.

Как указывалось выше, для развития эффективной системы распределенного энергоснабжения необходимо создание автономных источников энергии, работающих на местных (региональных) топливно-энергетических ресурсах.

Производство электрической энергии при использовании торфа в виде первичного источника требует разработки новых подходов. Эффективных технологий получения электрической энергии из торфа в установках сравнительно небольшой мощности для нужд распределенной энергетики не существует ни у нас в стране, ни за рубежом. Одним из решений проблемы является получение из биомассы энергетического газа с высокими теплотехническими характеристиками с последующим использованием в газопоршневых или газотурбинных установках для выработки электрической энергии. Исследованиями установлено, что при мощностях до 3 МВт использование газопоршневых электростанций и мини-ТЭЦ экономически эффективнее, чем использование газо-турбинных установок.

К настоящему времени известны две технологии получения энергетического газа при термической переработке биомассы: газификация и пиролиз. При пиролизе (нагреве перерабатываемого материала без

доступа окислителя) возможно получение энергетического газа с теплотворной способностью до 5000 ккал/м<sup>3</sup>, побочными продуктами пиролиза является твердая и жидкая фаза. Теплота сгорания получаемой газообразной фазы не превышает 25% от энергии, аккумулированной в перерабатываемой биомассе. Оставшаяся энергия распределяется между жидкой и твердой фазами. С экологической точки зрения жидкая фаза пиролиза небезопасна, ее переработка, либо утилизация связана со значительным усложнением технологии и дополнительными затратами. При обращенной газификации проблема очистки от жидкой фазы (смола) также существует, но в меньшей степени. Недостатком всех ныне существующих технологий газификации является низкие потребительские свойства получаемого газа: теплотворная способность не выше 1300 ккал/м<sup>3</sup>, а адиабатная температура горения – 14000С. Получаемый при газификации газ примерно на 50–60% состоит из водорода и окиси углерода, остальное – азот. При парокислородном дутье показатели улучшаются, но значительно возрастают капитальные вложения и эксплуатационные расходы. Использование газа с низкой теплотворной способностью в современных энергетических агрегатах, рассчитанных на высокие тепловые нагрузки, неэффективно. Для энергетического использования продуктов переработки биомассы необходимо осуществление процесса получения энергетического газа экологически безопасными методами, при этом получаемый газ должен иметь достаточный уровень теплотехнических параметров, обеспечивающий возможность его использования в современном высокоинтенсивном энергетическом оборудовании.

Принципиально эта проблема может быть решена двумя методами. На Западе в течение последних лет прорабатываются процессы производства из низкокалорийного газа, получаемого при газификации, высококалорийного газа с достаточно высоким содержанием метана, который в дальнейшем может быть эффективно использован в

энергетических агрегатах. Отделение балластных газов, каталитическое метанирование – достаточно сложные и дорогостоящие процессы. Подход, реализованный в Объединенном институте высоких температур РАН, заключается в переработке биомассы с получением энергетического газа с калорийностью на уровне 2500...3000 ккал/м<sup>3</sup> и адиабатной температурой горения 1900...2000С. Получаемый газ может быть непосредственно использован в виде топлива в современных энергетических агрегатах, рассчитанных на высокие тепловые нагрузки.

В разрабатываемой технологии конверсии биомассы в энергетическое топливо на первой стадии проводится пиролиз биомассы с образованием газообразных, жидких и твердых продуктов. Жидкая фаза состоит из набора высокомолекулярных соединений  $C_nH_mO_p$  и пирогенетической воды. При температурах пиролиза свыше 4000С жидкие продукты находятся в паровой фазе и составляют конденсируемую часть газообразных продуктов пиролиза. Неконденсируемая часть состоит в основном из CO, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>. Парогазы пиролиза продуваются через твердую углеродную фазу, образующуюся при пиролизе на первой стадии процесса. При этом пирогенетическая вода, находящаяся в паровой фазе, взаимодействует с углеродом с образованием водорода и окиси углерода по реакции  $C+H_2O=CO+H_2$ . Высокомолекулярные соединения, входящие в состав конденсируемой фазы, разлагаются при фильтрации через засыпку высокотемпературного углерода с образованием водорода и окиси углерода. Таким образом, осуществляется конверсия жидких и твердых продуктов реакции в водород и окись углерода, что обеспечивает максимальную конверсию биомассы в синтез-газ с получением высококалорийных энергетических газов.

Основным достоинством разрабатываемой технологии является высокая степень конверсии энергии перерабатываемой биомассы в энергетический газ. В существующих технологиях пиролиза эта величина не превышает 0,18, в разрабатываемой технологии – 0,7÷0,75. Количество

выделяющихся газов – около 1,4 нм<sup>3</sup> на кг исходного продукта, а теплотворная способность получаемого газа – около 3000 ккал/нм<sup>3</sup>. По составу получаемая газовая смесь состоит из окиси углерода и водорода.

#### 4.3 Оценка необходимых капитальных затрат

Величина капитальных затрат на создание основного технологического оборудования, на строительство установки оценены на основании работ, выполненных Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Эта организация проводит систематические работы по созданию современной технологии производства древесного угля для стран, являющихся традиционными потребителями этого вида топлива в бытовом секторе, прежде всего для Южной и Юго-Восточной Азии.

Детальные исследования FAO позволяют достаточно точно оценить составляющие затрат, связанных с основным технологическим процессом – глубоким пиролизом торфа, и получением газообразного и твердого угольного остатка (твердого топлива и кокса) для установок различной производительности.

По условиям технической совместимости с предлагаемым процессом термической переработки торфа все выполненные ниже экономические расчеты базируются на показателях технологии с футерованными ретортами. В расчетах использовалась величина производительности по условному углеродному материалу, который можно было бы получить из того количества торфа, которое необходимо для энергетического комплекса заданной электрической мощности.

##### *Удельные капитальные затраты*

Методика расчета основана на известной степенной зависимости УКЗ от производительности установки. Эта зависимость представлена уравнением:

$$\text{УКЗ} = 11743X^{-0,474}$$

УКЗ – удельные капитальные затраты, \$/т

X – мощность установки по углеродному материалу, т/год

В табл. 4.1 представлены значения капитальных затрат с распределением по статьям сметно-финансового расчета (СФР) на сооружение газогенераторной установки газопоршневой мини-ТЭЦ для условий России с учетом удешевления расходов на выполнения строительно-монтажных работ и приобретения отечественного оборудования по отношению к существующему уровню затрат на выполнение аналогичных работ в западных странах.

Таблица 4.1 - Капитальные затраты по позициям СФР для условий России для комплекса электрической мощностью 500 кВт

Позиции СФР	Тыс. дол. США	Примечания
Подготовка территории	19,28	
Энергия и водоснабжение	11,23	
Основное оборудование, всего	452,7	Установка по термической переработке торфа \$ 220 тыс. энергетическая установка \$232,7 тыс.
Вспомогательное оборудование	29,54	
Транспортное хозяйство	15,02	
<i>Суммарные КЗ</i>	<i>527,8</i>	

В таблице 4.2 представлены исходные данные для расчета показателей экономической эффективности использования торфа в качестве первичного энергоносителя для производства тепло- и электроэнергии в энергокомплексе электрической мощностью 500 кВт.

В таблице 4.3 представлены расчетные показатели экономической эффективности использования торфа в качестве первичного источника энергии автономной энерготехнологической установки, состоящей из реактора по термической переработке биомассы и газопоршневой установки электрической мощностью 500 кВт.

Таблица 4.2 - Исходные данные для расчета показателей экономической эффективности автономного энергокомплекса электрической мощностью 500 кВт

№№пп	Наименование	Размерность	Величина	Примечания
1.	Коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую	б/р	0,3	
2.	Отношение тепловой мощности к электрической	б/р	1,5	0,645 Гкал/ч для электрической мощности 500 кВт
3.	Расход теплоты на внутренние нужды	ккал/кг торфа МДж/кг торфа	800 3,35	19% располагаемой теплоты
4.	Теплотворная способность пиролизных газов	ккал/нм <sup>3</sup> МДж/нм <sup>3</sup>	2440 10,22	
5.	Коэфф. конверсии энергии торфа в химэнергию газа	б/р	0,7	
6.	Коэффициент использования установки	б/р	0,9	

Таблица 4.3 - Расчетные показатели экономической эффективности энергокомплекса электрической мощностью 500 кВт

№№пп	Наименование	Размерность	Величина	Примечания
1.	Мощность по торфу: на сухое вещество на влажное	тыс. т/год	2,17 3,616	
2	Товарная продукция: электроэнергия теплоэнергия	млн.кВтч/год Гкал/год	3,942 5085	0,645 Гкал/ч
3.	Эксплуатационные издержки, всего	тыс. \$/год	172÷242	В зависимости от цены торфа
4.	Себестоимость 1 кВт.ч э/э 1290 ккал тепловой энергии	\$	0,044÷0,061	В зависимости от цены торфа
5.	Срок окупаемости	год		См. рис. 4.2



Сроки окупаемости газопоршневых установок различной мощности, работающих на газовом топливе, полученным по разрабатываемой технологии термической переработки торфа в зависимости от цены торфа представлены на рис. 4.2.

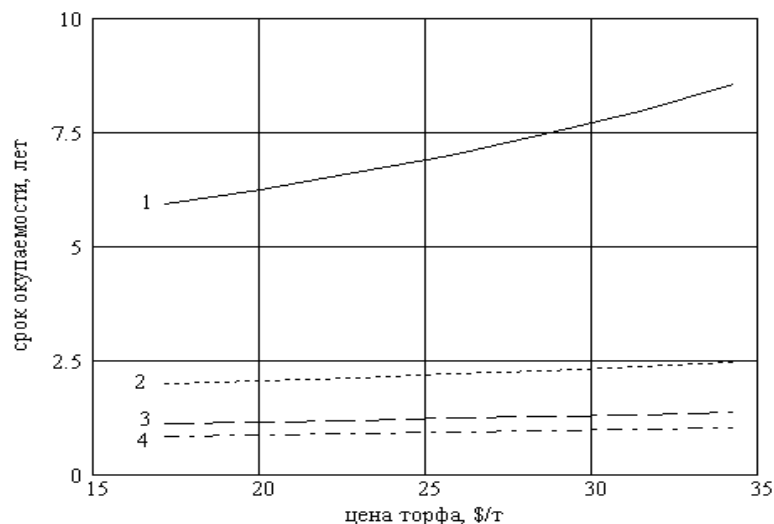


Рисунок 4.2 – Зависимость срока окупаемости энергокомплекса с газопоршневой электростанцией различной мощности от цены торфа: 1 – газопоршневая электростанция мощностью 200 кВт; 2 – 500 кВт; 3 – 1 МВт; 4 – 1,5 МВт

#### 4.4 Производство торфяного кокса и твердого топлива

Торфяной кокс и твердое топливо получают в результате глубокого пиролиза (карбонизации) торфа. До 1940 г. в СССР 40% металлургического кокса производилось из торфа. В 50-х г.г. после ввода в эксплуатацию месторождений коксующихся углей получение кокса из торфа стало экономически нецелесообразным. Однако в последние годы произошло резкое сокращение запасов коксующихся углей. В связи с этим цены выросли.

Динамика цен на металлургический кокс (\$/т) показана в табл. 4.4.

Таблица 4.4 - Цены на кокс российских производителей (\$/т)

№ пп	Дата	Цена
1.	Август 2005 г.	200
2.	Апрель 2006 г.	185
3	Август 2007 г.	220
4.	Февраль 2008 г.	390
5.	Май 2010 г.	490
6.	Январь 2011 г.	370
7.	Май 2012 г.	310

Несмотря на обычное рыночное колебание цен, просматривается явная тенденция к их повышению. Понижение цен в 2011 и 2012 г.г. может быть объяснено значительным импортом дешевого кокса из Китая.

В настоящее время производство торфяного кокса вновь может быть экономически оправданным. В Швеции и Финляндии торфяной кокс производится и в настоящее время на основе пиролиза во вращающихся печах. Однако известно, что интенсивность процессов тепло- массообмена в этом случае чрезвычайно низкая, что предопределяет значительную металлоемкость и стоимость основного технологического оборудования. Кроме того, экологический контроль затруднен. В разрабатываемом проекте интенсивность обменных процессов между термообрабатываемым материалом и теплоносителем на порядок выше, соответственно стоимость оборудования ниже.

Отработка технологии карбонизации торфа с получением твердого топлива и кокса явилась задачей исследований по проекту комплексной переработки торфа.

#### **4.5 Производство активных углей**

Активный уголь (АУ) производят двумя способами: активирование паром по реакции  $C+H_2O=CO+H_2$  и химическим активированием. Наиболее распространен первый метод. Реакция углерода с водяным паром

является эндотермической: на один моль прореагировавшего углерода требуется затратить 31,14 ккал(130 кДж). За счет использования различных видов сырья, методов активирования, дополнительной обработки после активирования производится большое количество самых разнообразных АУ. Применение очень широкое: от получения сверхчистой воды и очистки от поллютантов дымовых газов до очистки поверхности вод от нефтяных пятен.

В Советском Союзе на начало 1991 г. производилось 40 тыс.т АУ при потребности в 110 тыс.т.

После 1991 г. производство АУ в России резко снизилось и не превышает 3–5 тыс.т.

К сырью для производства АУ предъявляются определенные требования, в частности по содержанию нелетучего углерода, зольности и поставочной стоимости. С этой точки зрения торф и АУ на его основе обладают многими достоинствами:

- дешевизна
- большие запасы
- пластичность (торф хорошо перемешивается с добавками и гранулируется)
- высокое качество торфяных АУ
- широкий спектр применения.

Перспективным является расширение производства АУ за счет строительства предприятий вблизи источников сырья, при стабильно работающих торфпредприятиях с устойчивыми качественными показателями торфа: степенью разложения более 28%, зольностью менее 5%. Неисчерпаемыми источниками такого сырья могут служить западные и восточные районы Сибири, где производство АУ отсутствует.

Организация производства может предусматривать строительство модулей мощностью 1500 т/год с дальнейшим их тиражированием.

Проектная и конструкторская документация выполнена ОАО Центральное проектно-конструкторское бюро химического машиностроения. Техничко-экономические показатели модуля мощностью 1500 т/год представлены ниже.

*Потребность в сырье и материалах*

- торф 14500 т/год
- химикаты 400 т/год (предусмотрена химическая активация)
- мешки бумажные 150000 шт.

*Топливо и энергия*

- природный газ 5 млн. куб.м/год
- электроэнергия 6 млн.кВт.ч

*Техничко-экономические показатели.*

Выпуск продукции (АУ СКТ)–1500 т/год

Объем реализации–3 млн.USD

Оптовая цена продаж–2000 USD/т

Чистая прибыль–1,5 млн.USD

Капиталовложения 3 млн. USD

Срок окупаемости 2 года.

#### **4.6 Выводы**

1) Развитие распределенной региональной энергетики является одним из важнейших направлений создания надежной системы энергообеспечения. Потребность в автономных установках для производства электроэнергии и тепла с использованием местных энергетических ресурсов исключительно велика. В России газифицировано немногим более 50% населенных пунктов. Значительное количество населения страны проживает в местах, обладающих ресурсами возобновляемых местных топлив. В то же время обеспечение энергоснабжения многих отдаленных регионов за счет привозных топлив требует значительных финансовых затрат и не всегда надежно. Приоритетные направления развития распределенной энергетики должны

определяться на базе технико-экономического анализа, результатом которого должно быть определение технологий, позволяющих получить максимальный экономический эффект.

2) Для развития распределенной энергетики необходима разработка новых методов газификации торфа. Как показано в настоящем проекте, энергия газообразного топлива при пиролизе составляет не более 20% исходной энергии торфа. Для глубокой конверсии энергии, аккумулированной в торфе, в энергию газообразного топлива необходимы новые технологии газификации.

3) Производство активных углей из торфа является экономически выгодным.

4) Производство твердого карбонизированного топлива из торфа и торфяного кокса находится на начальной стадии. Даже предварительные оценки показывают целесообразность их производства. В некоторых отношениях карбонизированный торф аналогичен торрифицированному биотопливу: негигроскопичен и имеет высокую объемную теплотворную способность, что делает выгодным его перевозки и хранение.

## 5 ПРОВЕДЕНИЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1 Рынок торфяного твердого топлива и оборудования для его переработки в энергетическое топливо

Торф является широко распространенным видом твердого топлива, однако его прямое использование без предварительной механической и термохимической переработки встречает определенные трудности. Торф имеет низкую плотность, низкую объемную теплотворную способность, поэтому его перевозка и хранение имеют низкую рентабельность. Для повышения ценности торфа как топлива производят его механическую обработку: брикетирование и пеллетизацию.

На рис.5.1 показаны образцы топливного торфа.



Рисунок 5.1 – Образцы топливного торфа: а) фрезерный топливный торф; б) торфяные топливные брикеты; в) кусковый топливный торф; г) гранулированный торф(пелеты)

Торф является экологически чистым видом топлива. В табл.5.1 показаны показатели качества различных видов топлива.

Таблица 5.1 – Показатели качества различных видов топлива

Вид топлива	Низшая теплота сгорания		Зольность на раб.массу, %	Сера на рабочую массу, %
	ккал/кг	МДж/кг		
Торфяные пеллеты	4200	17,30	4,0–15,0	0,15–0,27
Торф фрезерный	2200–2590	9,2–10,9	2,04–4,1	0,15–0,27
Торф кусковой	2950–4500	12,3–18,9	1,5–25	0,2
Мазут М-100	9500	40	0,15	3,5
Кам.уголь (Инта)	3900	16,3	38	2,8
Карбонизированный торф*	7000	29,4	3–5	Следы

\*данные настоящего проекта

Приведенные в таблице данные показывают:

По потребительским свойствам торф не только не уступает каменным углям, но и превосходит их;

По содержанию серы и зольности торф уступает только природному газу и древесине;

Полученный в настоящем проекте карбонизированный торф (твердое высококалорийное топливо) превосходит по сумме потребительских качеств большинство ископаемых традиционных топлив.

Эффективность замещения торфом других видов топлива в котельных обосновывается следующими факторами:

Конкурентоспособность торфа по сравнению с дальнепривозными углем и мазутом;

Незначительные инвестиции в реконструкцию котельных, работающих на угле, и перевод на торфяное топливо. Реконструкции подлежат элементы вспомогательного оборудования (склады, расходные бункера и др.). Собственно котлоагрегат реконструкции не подвергается;

Замещение торфом других, более дефицитных видов топлива, в частности мазута и природного газа;

Улучшение экологических условий на топливопотребляющих предприятиях и окружающей природной среды;

Социально значимые последствия: создание дополнительных рабочих мест в экономически отсталых районах России.

Расчетами специалистов Гипроторфа определено, что подвод воздуха на горение топлива и отвод дымовых газов может быть осуществлен в пределах расчетных характеристик дутьевых вентиляторов и дымососов, т.е. замена тяго-дутьевого оборудования не потребуется.

Следовательно, перевод муниципальных котельных с угля на торф не всегда требует их реконструкции и существенных инвестиций. В отдельных случаях перевод вообще не потребует инвестиций.

Если стоимость 1 Гкал тепла, полученного в котельных, работающих на торфе, принять за 1, то стоимость 1 Гкал в котельных, работающих на других видах топлива, оценивается в следующих величинах:

- каменный уголь ~2
- природный газ 0,9–1,0
- топочный мазут 1,5–2,0

Например, в Северо-Западном Федеральном округе насчитывается около 3400 котельных, работающих на твердом топливе (74% от общего числа котельных).

Если условно принять мощность котельных в среднем по 10 Гкал/час, то потребность в тепловой энергии каждой из них в отопительный период за 7 месяцев составит:

$$30 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 10 = 50400 \text{ Гкал}$$

Если использовать для отопления фрезерный торф с теплотворной способностью 2200 ккал/кг и коэффициентом использования топлива в котельной КПД=0,85, то торфа потребуется



$$M=50400/(2200 \cdot 10^{-6} \cdot 0,85)=27 \text{ тыс.т.}$$

Если для отопления использовать карбонизат торфа (высококалорийное твердое топливо) с теплотворной способностью 7000 ккал/кг, то такого топлива потребуется 8,5 тыс.т.

В России имеется много котельных, работающих на твердом топливе. Например, в Северо-Западном округе таких котельных 3300.

Потребность округа составит 89 млн.т фрезерного торфа и 28 млн.т торфяного карбонизата. Для обеспечения такого количества карбонизата необходимо построить несколько десятков установок мощностью 800 тыс.т/год.

Процесс газификации торфа осуществляется в газогенераторах различных конструкций. При газификации кускового и мелкокускового торфа необходим слой топлива значительной высоты. В этот слой, обычно снизу, подается паровоздушное или другое дутье, которое подогревается за счет теплообмена с зольным остатком. Подогретое дутье поступает в нижнюю часть слоя топлива (окислительную зону), где с помощью кислорода сжигается коксовый остаток с образованием значительного количества углекислоты. Продукты горения поднимаются в восстановительную зону, где протекают основные реакции газификации, в результате эндотермического эффекта которых температура газов снижается, но остается еще высокой и способной прококсовать вышележащее топливо. В самой верхней части слоя газы подсушивают торф, после чего отводятся из газогенератора для очистки от пыли, смолы и водяных паров. При обычном прямом процессе газификации газы движутся по шахте газогенератора противотоком по отношению к топливу, а при обратном процессе, применяемом для разложения смолы в производстве силового газа, газы и топливо движутся в одном направлении. Кроме непрерывно действующих процессов применяются и периодические для производства водяного газа из торфяного кокса. Принципы и конструктивные оформления процессов газификации

фрезерного и пылевидного торфов весьма различны, хотя в основе их лежат реакции окисления и восстановления углерода и его соединений.

Газогенератор кускового торфа (основной элемент газогенераторной станции рис.5.2) – цилиндрическая шахта, верхняя часть которой футерована шамотом, а половина нижней части занята кольцевой пароводяной рубашкой. На верху газогенератора расположена загрузочная коробка с затворами и цилиндром. Газогенератор оборудован вращающейся решеткой Коллера с чашей для ввода дутья, удаления золы и создания гидрозатвора.

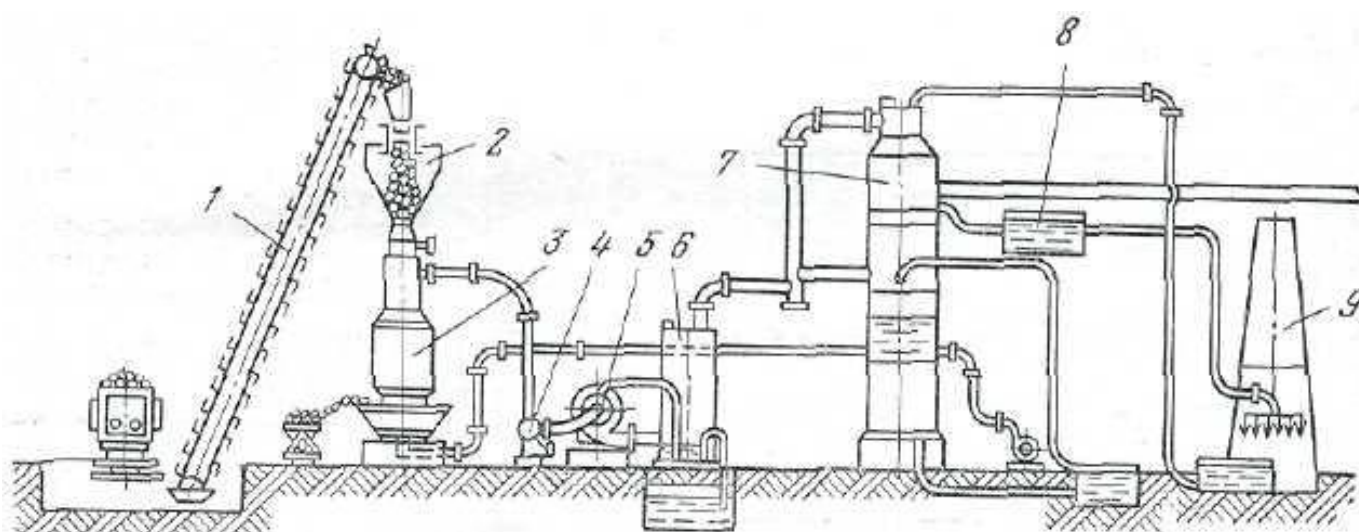


Рисунок 5.2 – Схема газогенераторной станции

Торф из приемного устройства элеватором 1 подается в бункер 2, проходит газогенератор 3; зола удаляется в отвал. Парогазовая смесь проходит стояк с гидрозатвором и по коллектору 4 поступает в смолоотделитель 5, каплеуловитель б, в среднюю и затем в верхнюю часть скруббера 7, в котором газ охлаждается водой и поступает потребителю. После маслоотделителя 8 вода средней части скруббера насыщает дутьевой воздух, а верхней части — охлаждается в градирне 9; избыток воды сбрасывается на очистку. Применяются и другие схемы очистки газа.

Торф из приемного устройства элеватором 1 подается в бункер 2, проходит газогенератор 3; зола удаляется в отвал. Парогазовая смесь проходит стояк с гидрозатвором и по коллектору 4 поступает в смолоотделитель 5, каплеуловитель б, в среднюю и затем в верхнюю часть

скруббера 7, в котором газ охлаждается водой и поступает потребителю. После маслоотделителя 8 вода средней части скруббера насыщает дутьевой воздух, а верхней части — охлаждается в градирне 9; избыток воды сбрасывается на очистку. Применяются и другие схемы очистки газа.

Нормальная пропускная способность газогенератора 60 т торфа в сутки. В пределах изменения влажности торфа (18-45%), нагрузки площади сечения шахты (230—430 кг/м<sup>2</sup>) и температуры паро-воздушной смеси (51-58°С) состав газа незначительно отклоняется от средних данных и составляет: CO<sub>2</sub> — 8,4%; CmHn — 0,4; O<sub>2</sub> — 0,2; CO — 27,0; H<sub>2</sub> — 16,5; CH<sub>4</sub> — 2,9; N<sub>2</sub> — 44,6%. Теплота сгорания Q<sub>V</sub> = 6,97 МДж/нм<sup>3</sup>; Q<sub>n</sub> = 6,5 МДж/нм<sup>3</sup>. Выход газа составляет 2,3—2,4 нм<sup>3</sup>/кг, а выход смолы 9-12% органической массы торфа. В газ переходит около 68 % теплоты торфа, а с учетом теплоты смолы тепловой к. п. д. составляет около 82%.

Особое внимание стоит уделить новой технологии БиоРЕКС™, разработанной компанией ООО «ЦентрИнвестПроект».

Компания ООО «ЦентрИнвестПроект» предлагает технологию позволяющую производить из торфа или бурого угля синтетический или генераторный газ – смесь CO и H<sub>2</sub> с теплотворной способностью 1200 Ккал – альтернатива природного газа, мазута и угля в паровых котлах, дизельного топлива в дизель-генераторах, универсальное сырье для производства продуктов органической химии, включая моторные топлива (бензин и дизельное топливо) второго поколения.

Технология БиоРЕКС™ представляет идею взвешенного взаимодействия с природой при разработке полезных ископаемых, в частности Торфа и Бурых углей, а также способ объединения нескольких производств в высокоэффективную технологическую линию в полностью безотходном цикле, в соответствии с самыми строгими требованиями природоохранного законодательства – Локальный энергетический комплекс (ЛЭК).

Применяемые уникальные технические решения позволили создать технологическую линию с нулевым выбросом, перерабатывающую разные марки торфов и бурых углей. Автономные, модульные, мобильные, в габаритах 6 и 12-ти метрового морского контейнера – установки не требуют подключения к инженерным сетям, сложных подготовительных строительных работ и пуско-наладки.

Модульность установки позволяет менять потребительские свойства изделия по желанию заказчика в момент её приобретения и наращивать, либо менять её возможности в процессе эксплуатации.

Её отличие от установок аналогичного назначения в том, что она является полностью конструкторской, а не проектной разработкой. Конструкторские решения позволили существенно уменьшить габариты, массу, и, соответственно понизить стоимость серийной установки.

Комплексы изготавливаются по принципу «полной технологии» как заводское изделие, проходят испытания в цехах производителя, имеют паспорт и инструкцию по эксплуатации и подлежат упрощенному порядку согласования в органах технического надзора.

Конструкция ЛЭК предусматривает трехкратную гарантию бесперебойности работы Комплекса: суточным запасом топлива, дублированием основных агрегатов с возможностью попеременного отключения для профилактики и оборудованием газгольдера или расходным ресивером для хранения резервного топлива опционально.

Описание технологического процесса переработки торфа и бурого угля:



Модуль ЛЭК мощностью 1 МВтэ, располагается в габаритах трех 12-ти метровых контейнеров, перерабатывающий 1 тонну торфа или бурого угля в час.

Сырье, поступающее на переработку, взвешивается на весовой платформе (1) и выгружается в герметичный приемный бункер (2), который является суточным запасом сырья. После чего поступает на брикетирование (3), и далее в бункер подготовленного сырья (4). В реактор (5) брикетированное сырье поступает по герметичному шнековому каналу (5) для выработки горючего газа.

## 5.2 Рынок активного угля и оборудования для его производства

В настоящее время практически нет ни одной области хозяйственной деятельности, где не применяется активный уголь (АУ).

Мировое производство достигло 500 тыс.т. Основное количество углей производится в промышленно развитых странах:

США–250 тыс.т

Япония–100 тыс.т

Европа–100 тыс.т

Структура потребления АУ представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Структура потребления АУ (в %%)

Отрасль производства	Россия	США
Пищевая промышленность	42,6	30
Очистка питьевой воды	4,7	23

Газоочистка	10	19
Медицина и фармацевтика	4,7	5,0
Технологическое использование	38	23

Потребность России в АУ с учетом уровня потребления развитых стран (0,5–1,0 кг на душу населения в год) должна составлять 100–150 тыс.т/год.

На начало 1991 г. в СССР производилось 40 тыс.т/год при общей потребности 110 тыс.т.

После 1991 г. производство АУ в России резко снизилось и составляло 3–5 тыс.т. В настоящее время эта отрасль промышленности постепенно восстанавливается. Для производства АУ используют разнообразные источники углеродсодержащего сырья, которое должно отвечать определенным требованиям: содержание нелетучего углерода, зольности и поставочной стоимости. Этим требованиям вполне удовлетворяет торф.

Производство АУ из торфа организовано в Нидерландах, Германии и России. Российское производство углей марки СКТ осуществляет Электростальский химико-механический завод. Эти угли находят широкое применение.

СКТ–1:

Улавливание паров органических растворителей, в качестве основы для приготовления различных поглотителей, для адсорбции радиоактивных благородных газов (аргон и др.).

СКТ–2:

Адсорбция химических соединений из газовой и жидкой фаз.

СКТ–3:

Рекуперация летучих растворителей с температурой кипения 60–1000С из паровоздушной смеси.

СКТ-4:

Тонкая очистка газов, очистка сточных вод.

СКТ–6:

Адсорбция паров органических веществ в системах газоочистки АЭС. Обладает высоко активностью по веществам с малым размерам молекул. Катализатор в производстве симазина (системный гербицит).

СКТ–7:

Снаряжение промышленных противогозов, адсорбция отравляющих веществ из жидкой и газовой фаз.

СКТ–10:

Наполнение запахопоглотителей, используемых в бытовых условиях.

СКТЛС:

Изготовление хемосорбентов.

После обеззоливания углей СКТ получают медицинские АУ. Их используют при пищевых токсикоинфекциях, отравлениях психотропными препаратами, алкогольном абстинентном синдроме, бронхиальной астме и других заболеваниях. Применяют в качестве гемосорбентов, т.е. препаратов, способных удалять из организма токсичные вещества путем очистки крови, плазмы, лимфы.

Учитывая многообразие областей применения, производство и рынок потребления АУ смещается в новые добывающие и промышленные центры в в Западной Сибири и в северных районах. Потребность в АУ и в настоящее время большая, но будет расти по мере развития новых промышленных центров. Необходимо отметить экологическую опасность применения химической активации: существует постоянная, не равная нулю вероятность выброса в атмосферу канцерогенных веществ в виде сернистых или фосфорных газов. Паровоздушная активация, разрабатываемая в настоящем проекте, является экологически чистой, вероятность выброса канцерогенов равна нулю.

Кроме того, внутреннее потребление тепловой энергии не нуждается в посторонних источниках, т.к. при производстве по нашей технологии образуются горючие газы, которых достаточно для внутреннего потребления.

Для производства активированного угля может использоваться различное сырье, содержащее углерод. К наиболее распространенному сырью при производстве активного угля относится торф, древесный, каменный и бурый уголь, а также скорлупа кокосового ореха.

Производство активированного угля включает в себя несколько стадий:

1. Карбонизация – сырье обжигается в безвоздушном пространстве при высокой температуре. Полученный уголь (карбонизат) на данной стадии является плохим адсорбентом, потому что поры у него очень малы.

2. Предварительное дробление – эту стадию проходят только крупные куски углей, так как активация углей больших размеров невозможна.

3. Активация – для этой стадии подходят угли, чей размер фракции составляет от 4 до 10 мм., но не более. Активация может осуществляться двумя способами: химическим и парогазовым. При химической активации обработка угля производится с применением специальных химических компонентов. Парогазовая активация предполагает обработку угля с помощью перегретого водяного пара или путем окисления угля газом.

Химическая активация угля.

Химическая активация угля представляет собой достаточно сложный технологический процесс, когда уголь обрабатывается при температуре от 200 до 650 градусов Цельсия с помощью одного из химикатов:

- солями, которые под действием высоких температур начинают выделять активирующий газ  $\text{CO}_2$  или  $\text{O}_2$ ;
- нитратами;



- карбонатами;
- кислотами-окислителями, в качестве которых может выступать фосфорная, серная, азотная и другие кислоты;
- сульфатами.

Активированный химическим способом уголь получает название в зависимости от использованного реагента, например, хлорцинковый активированный уголь.

Несмотря на высокое качество активных углей, полученных путем химической активации, этот метод имеет ряд недостатков. Так, например, в процессе производства образуются экологически опасные стоки, производственное оборудование быстрее подвергается коррозии, в результате чего это влияет на стоимость угля в сторону ее повышения.

Парогазовая активация угля.

Весь процесс парогазовой активации угля постоянно находится под строгим наблюдением специалистов. Уголь активируется при температуре от 800 до 1000 градусов Цельсия. Окислительными агентами в данном случае являются водяной пар и диоксид углерода. К сырью при паровой активации добавляются такие катализаторы как карбонаты и оксиды щелочных металлов.

Для производства активированного угля используют печи различного типа и конструкции.

Наибольшее распространение получили: многополочные, шахтные, горизонтальные и вертикальные печи, а также реакторы с кипящим слоем.

На сегодняшний день на рынке представлен обширный список оборудования для производства активного угля из древесины. Оборудование все универсальное и пригодно для производства активного угля из любых углеродосодержащих материалов, в т.ч. и торфа.

ЗАО «СИЛЭН» разработало вариант получения активированного угля (АУ), основанного на использовании ноу-хау авиационной промышленности и термодинамики процессов горения. За счет активации

энергии сгорания топлива можно получать высококачественный АУ с очень низкой себестоимостью при хорошей производительности. Это единственная в мире установка, где процесс производства активированного угля происходит в одной камере в одном процессе, что приводит к снижению себестоимости одного кг АУ. Необходимо отметить, что предлагаемый вариант установки может быть использован не только для получения, но и для регенерации использованного активированного угля с низким уровнем затрат. При этом установка практически не производит выброса вредных веществ в атмосферу. Основные компоненты установки запатентованы.

Режимы работы установки могут быть перестроены с тем, чтобы вместо активированного угля получать:

- просто уголь и тепло;
- пиролизный газ с производством метанола.

Основные технические данные

- Производительность установки по углю, т/сут. 2,5
- Загрузка реактора, т/сут 12,5
- Влажность древесины, %, не более 20
- Объём реактора, м<sup>3</sup> 2,035
- Температура в рабочей зоне реактора, °С 700
- Температура на внешней поверхности реактора, °С, не более 60
- Расход пиролизного газа через дожигатель, г/с 112
- Тепловая мощность камеры сгорания, кВт, 680
- Температура дымовых газов на выходе из дымовой трубы, °С, 120

### **5.3 Рынок торфяного кокса и оборудования для его производства**

Характеристики торфяного кокса в значительной мере зависят от происхождения и свойств исходного материала, а также от способа получения. Первый фактор оказывает большое влияние на зольность и механическую прочность кокса, второй – на количество летучих продуктов и, отчасти, также на механическую прочность. Состав и теплотворная

способность торфяных коксов различного происхождения могут сильно колебаться. В качестве средних можно принять следующие цифры:

- Углерод.....86,0%
- Водород.....1,9%
- Азот.....1,5%
- Кислород.....3,7%
- Теплотворная способность.....7200 – 7500 кал/кг

По своим свойствам торфяной кокс отличается в выгодную сторону от каменноугольного. Исходный материал – торф, содержит ничтожные количества серы и фосфора, что обуславливает почти полное отсутствие этих вредных для металлургии элементов в коксе. В этом отношении торфяной кокс приближается к древесному углю. Содержание серы в нём колеблется в районе 0,1% и, как правило, не превышает 0,2%, что примерно в 10 – 20 раз меньше, чем у каменноугольного кокса. Зольность торфяного кокса обычно также ниже, чем каменноугольного. При правильном выборе торфа для коксования содержание золы в конечном продукте не превышает 8 – 10%, в то время как зольность каменноугольного кокса составляет не менее 12%. Содержание летучих веществ в торфяном коксе зависит от способа коксования и колеблется от 6 до 8%. Аналогичный показатель каменноугольного кокса составляет около 1,5%. По механической прочности торфяной кокс уступает каменноугольному и находится на уровне хороших сортов древесного угля.

Специфической особенностью торфяного кокса является его высокая реакционная способность, существенно превышающая этот показатель у минерального кокса. Данное обстоятельство имеет большое значение для доменного процесса. Благодаря высокой реакционной способности углекислота, образующаяся из окиси углерода за счёт раскисления окислов железа будет восстанавливаться быстрее, в

результате чего процесс восстановления руды будет идти интенсивнее, чем при применении минерального топлива.

Необходимо сказать, что для получения кокса высокого качества необходимо применять торф, удовлетворяющий определённым требованиям. Например, для получения малозольного кокса необходимо применять малозольные сорта торфа. Если исходить из требования, что зольность кокса не должна превышать 8 – 10%, и учесть то обстоятельство, что зольность конечного продукта примерно в три раза превышает данный показатель у исходного сырья, то можно сделать вывод, что исходный торф не должен содержать более 2,5 – 3% золы. Этому требованию удовлетворяют верховые торфа. Другое требование к исходному сырью заключается в том, что степень гумификации торфа, предназначенного для коксования, должна находиться в пределах 35 – 65%.

Таким образом, для получения хорошего металлургического кокса должен применяться малозольный сфагновый торф, средне или хорошо разложившийся и хорошо переработанный.

Принимая во внимание сказанное выше, относительно качества торфа, пригодного для получения хорошего кокса, можно наметить в пределах европейской части России и на Урале торфяные массивы, на которых может быть развёрнута добыча торфа для коксования.

Таблица 5.3 - Торфяные массивы, пригодные для коксования

Регион	Площадь, тыс. га	Запасы торфа, млн. т
<u>Центр</u>		
1. Оршинский мох (Тверская обл.)	60	
2. Тугаллеский Бор (Шатурский р-н Моск. обл.)	20	
3. Радовецкий массив (Шатурский р-н Моск. обл.)	20	
4. Мезиновское и Суловское болота (Владимирская обл.)	5	
5. Керженское болото (Нижегородская обл.)	30	

Продолжение таблицы 5.3

Регион	Площадь, тыс. га	Запасы торфа, млн. т
<u>Северо-Запад</u>		
1. Назиевская группа	31	65
2. Спасские Мхи	30	60
3. Тесовско-Нерыльское и Мшинское болота	50	100
4. Зеленецкий мох	24	56
5. Поддубско-Кусяцкий Мох	30	55
6. Парсальско-Таменготская группа	7,5	15
<u>Урал</u>		
1. Шайтанское болото	7	12
Кошкардовское болото	10	20

У наших северных соседей (например, в Финляндии) технология производства торфяного кокса разработана и достаточно широко экспортируется.

При термохимической переработке торфа можно получать полукокс (максимальная температура 500–6000С) и прочный кокс при прокалке полукокса при 900–10000С. Во ВНИИТП проводятся работы по созданию промышленной технологии производства торфяного кокса, однако на рынке такой технологии еще нет.

В России рынок торфяного кокса практически отсутствует.

#### 5.4 Зарубежные технологии конверсии биомассы в топливо

В настоящее время большинство западных технологий преимущественно ориентированы на получение жидкостей.

Производство жидких продуктов пиролиза из биомассы началось сравнительно недавно. До 1989 года, единственным Европейским заводом по производству пиролизного масла и угля являлась демонстрационная итальянская установка Alten мощностью 500 кг/ч с выходом по каждому продукту 25 %. Примерно в это же время в Швейцарии работало предприятие карбонизации отходов лесопереработки и муниципальных отходов Bio-Alternative, побочным продуктом с выходом 20 % являлось масло. Получаемые продукты данных заводов были успешно протестированы, и это вызвало интерес к получению пиролизных масел.

Масло, которое получают в результате пиролиза биомассы часто называют «био-масло», «пиролитическое масло» или «первичное масло». Основные пути переработки пиролизного масла показаны на рисунке 5.3. Другой основной продукт – это жидкая смесь, основным компонентом которой является суспендированный древесный уголь (до 60 %). В смесь обычно добавляются химические вещества – стабилизаторы суспензии.

Важным показателем сырья и продуктов пиролиза является энергетическая плотность 1 м<sup>3</sup> материала. Это связано, прежде всего, с коммерческими показателями практического использования продуктов переработки торфа (транспортировка, хранение и др.). В этом отношении пиролизное масло (30 ГДж/м<sup>3</sup>) и смесь масла с углем (26 ГДж/м<sup>3</sup>) явно опережают древесный уголь, щепу и т. д. Энергетическая емкость и плотность некоторых видов сырья и продуктов пиролиза показаны в таблице 5.3. Следует иметь в виду, что приведенные данные являются усредненными величинами, так, например, энергетическая емкость пиролизного масла, по другим данным, может изменяться от 17 ГДж/кг до 44 ГДж/кг.

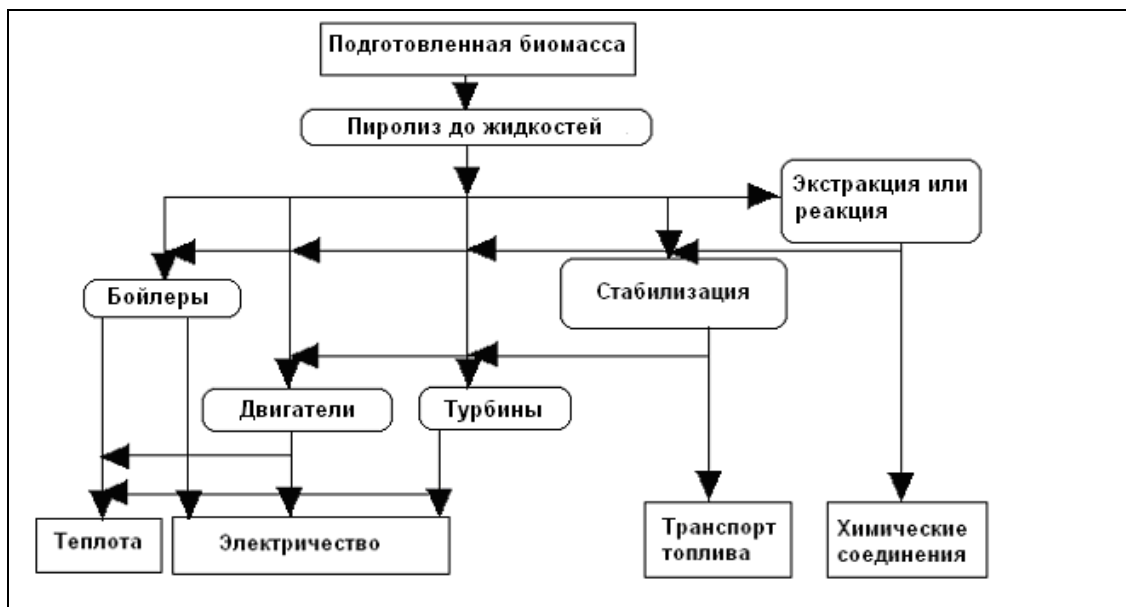


Рисунок 5.3 – Направления переработки жидких продуктов пиролиза

Таблица 5.3 - Потребительские качества сырья и продуктов пиролиза

Сырье/продукты	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Энергетическая емкость, ГДж/т	Энергетическая плотность, ГДж/м <sup>3</sup>
Солома	100	20	2
Щепа	400	20	8
Пиролизное масло	1200	25	30
Древесный уголь	300	30	9
Смесь уголь-вода (50/50)	1000	15	15
Смесь уголь-масло (20/80)	1150	23	26

В таблице 5.4 приведены ключевые условия и общие особенности исполнения пиролиза. Чтобы существенно увеличить выход газа или масла применяют так называемый быстрый пиролиз двух типов «флеш-газ» или «флеш-жидкость», которые проводятся при различных температурах. В большинстве случаев температура пиролиза составляет 400...1000°C, при скорости нагрева 1000...10000°C/с, что обеспечивает быстрые скорости конверсии. Регулирование скорости охлаждения и последующий быстрый выход на заданную температуру позволяет получить требуемые продукты. Важным требованием (см. табл. 5.4) является точное регулирование температуры пиролиза. Тип пиролиза непосредственно влияет на конструкцию реактора и организацию процесса конверсии. В настоящее время предпочтительными является псевдосжиженный или «кипящий» слой и псевдосжиженный слой с циркуляцией (таблица 5.5). Различия между типами пиролиза достаточно условны, а введение дополнительных регулирующих факторов (вакуум, давление, частичный рецикл пиролизного газа и угля, подача инертных газов и пара, применение катализаторов, способ нагрева, организация движения реакционной массы и др.) еще в большей степени усложняет систематизацию имеющихся технологий. В таблице 5.6. приведено распределение наиболее важных установок пиролиза в соответствии с их производительностью.

Таблица 5.4. - Ключевые условия и особенности исполнения пиролиза

<b>Предварительный этап</b>	
Сушка материала	Необходимая влажность ~ 10%
Размер частиц	Необходимы маленькие частицы.
Отмывка и введение различных добавок	Необходимы при производстве химикатов
<b>Основной этап – реактор</b>	
Конфигурация реактора	Разработано много конфигураций, но оптимальной не существует
Потребление тепла	Необходима высокая скорость теплопереноса
Теплоперенос	Газ-твердое тело и/или твердое-твердое
Скорости нагревания	Теплопроводность биомассы лимитирует скорость нагревания
Средняя температура	500°C
<b>Заключительный этап - кондиционирование и накопление продукта</b>	
Время обработки паром	Имеет критическое значение для получения химикатов, меньше для топлив
Вторичный крекинг	Снижает выходы
Отделение древесного угля	Процесс сложный, если достаточно большое количество других продуктов (газ и масло)
Отделение золы	Процесс более сложный, чем отделение угля
Накопление жидкостей	Сложно



Таблица 5.6 - Технологии и разработчики

Организация	Страна	Технология	Кг/ч	Состояние
Bio-Alternative	Швейцария	«Кипящий» слой	50	Остановлен в 1993
BTG	Нидерланды	Вращающийся конус	50	Рабочий
University of Hamburg	Германия	«Кипящий» слой	50	Рабочий
University of Laval	Канада	Слой, движущийся под действием вакуума	50	Рабочий
University of Shenyang	Китай	Вращающийся конус	50	Остановлен
WWTC	Канада	Печь-кильн	42	Рабочий
Ensyn	Канада	Циркулирующий перемещаемый слой	40	Рабочий
Dynamotive	Канада	«Кипящий» слой	20	Рабочий
NREL	США	Разделительная воронка	30	Разобран
NREL	США	Разделительная воронка	20	Рабочий
RTI	Канада	«Кипящий» слой	20	Рабочий

Типичный процесс может быть охарактеризован следующим образом: исходную биомассу предварительно измельчают, высушивают и затем подают в реактор; необходимую энергию обеспечивают сжиганием части биомассы или применяя носители тепла (например, песок). Система циклонов и конденсаторов позволяет концентрировать твердые и жидкие продукты. В эффективных технологиях пиролиза, газообразные продукты используются как для генерирования энергии необходимой для сушки исходной биомассы, поддержания основного процесса и использования внешними потребителями и др., часть возвращаются в реактор, что позволяет регулировать параметры конверсии. Общая схема пиролиза приведена на рис. 5.4.

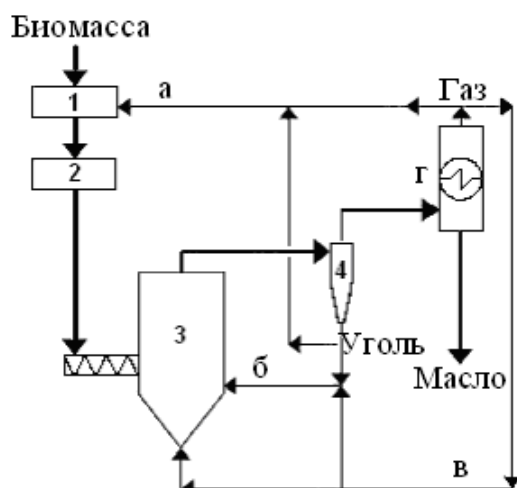


Рисунок 5.4 –Общая схема пиролиза биомассы в псевдооживленном слое: 1 – сушилка; 2 – измельчитель; 3 – реактор; 4 – циклон. Поток: а – теплота на сушку; б – теплота на пиролиз; в – газ в рецикл; г – на охлаждение и конденсацию.

### Технологии пиролиза

Технологические параметры различных вариантов пиролиза и получаемых продуктов представлены в таблицах.

Таблица 5.7 - Технологические параметры различных вариантов пиролиза

Технология	Время	Скорость нагрева	Температура °С	Продукт
Карбонизация	Несколько дней	очень низкая	400	Древесный уголь
Конвекция	5...30 мин	низкая	600	масло, газ, уголь
Быстрый	0,5...5 с	очень высокая	650	Пиролизное масло
Флеш-жидкость	< 1 с	высокая	< 650	Пиролизное масло
Флеш-газ	< 1 с	высокая	< 650	Химикаты, газ
Ультрапиролиз	< 0,5 с	очень высокая	1000	Химикаты, газ
Вакуумпиролиз	2...30 с	средняя	400	Пиролизное масло
Гидропиролиз	< 10 с	высокая	< 500	Пиролизное масло
Метанопиролиз	< 10 с	высокая	> 700	Химикаты

Таблица 5.8 - Технологические параметры и характеристики получаемых продуктов

Характеристика	Флеш-жидкость	Флеш-газ	Медленный	Карбонизация
Размер частичек	маленький	маленький	средний	большой
Влажность	очень низкая	очень низкая	низкая	низкая
Параметры				
температура °С	450...600	650...900	500...600	450...600
давление, атм	1	0,1...1	1	1
Максимальная производительность, т/ч	0,05	0,02	5	10
Продукты				
Газ, %	< 30	< 70	< 40	< 40
МДж/м <sup>3</sup>	10...20	10...20	5...10	2...4
Жидкость, %	< 80	< 20	< 30	< 20
МДж/кг	23	23	23	10...20
Твердое, %	< 15	< 20	< 30	< 35
МДж/кг	30	30	30	30

Сравнительный анализ нескольких известных технологий в соответствии с основным получаемым продуктом приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 - Сравнительный анализ нескольких известных технологий в соответствии с основным получаемым продуктом

Технология пиролиза	Компания / Организация	Производительность, кг/ч	Распределение газ/масло/уголь		Температура, °С
			Основной Продукт	%	
Неподвижный слой	Bio-Alternative	2000	Уголь	55/15/30	500...800
Псевдосжиженный слой	THEE	500	Газ	80/10/10	650...1000
С печью	Univ.	100	Газ	90/8/2	1000...2000

излучения	Zaragoza				000
Конвекция	Alten	500	Масло		
Псевдосжиженный слой с циркуляцией	Ensyn Engineering	30	Масло	25/65/10	450...800
Быстрого потока	Georgia Tech Research Ins.	50	Масло	30/60/10	400...550
Вакуум	Laval University	30	Масло	15/65/20	250...450
Реактор с «водоворотом»	Solar Energy research Ins.	30	Масло	35/55/10	475...725
Флеш с псевдосжиженным слоем	Waterloo University	3	Масло	20/70/10	425...625
Реактор с конусом вращения	Univ. Twente	10	Масло	20/70/10	500-700

Таблица 5.10. - Характеристики различных технологий пиролиза с получением пиролизного масла

Технологии→	GIT	Ensyn	laval	SERI	Twente
Температура, °С	500	550	480	510	600
Давление, атм	1,0	1,0	0,01	1,0	1,0
Скорость подачи, кг/ч	50	50	30	30	12
Размер частиц, мм	0,5	0,2	10	5	0,5
Время, газ, с	1,0	0,4	3	1,0	0,5
Время, твердое, с	1,0	0,4	100	–	0,5
Выход, газ, %	30	25	14	35	20
Выход, масло, %	60	65	65	55	70
Выход, уголь, %	10	10	21	10	10
<b>Характеристики получаемого масла</b>					
Плотность	1,23	1,21	1,23	1,20	1,20
Вязкость, сП	10 (60с)	90 (25с)	5 (40с)	90 (30с)	80 (20с)
С, %	39,5	45,5	49,9	54,4	43,2

Н, %	7,5	7,0	7,0	5,7	8,2
О, %	52,6	45,4	43,0	39,8	48,6
МДж/кг	24	19,3	21	15	25
Влажность, %	29	16	18	15	25

Из приведенных выше данных, следует, что технологии чрезвычайно сложны в аппаратном оформлении, требуют дополнительных операций по кондиционированию получаемого жидкого топлива. Для Западной и Центральной Европы эти технологии, по-видимому, являются предпочтительными, т.к. эти регионы не обладают такими богатыми, разнообразными и распределенными биоресурсами, как Россия. Для России же важно максимально приблизить энергию к потребителю, для чего необходимо использовать местные ресурсы биосырья, например, торфа.

#### **5.4 Выводы**

1. Производство АУ после почти двадцатилетнего упадка начинает постепенно восстанавливаться, в т.ч. и с использованием торфяного сырья.

2. В настоящее время Россия импортирует около 100 тыс.т активных углей.

3. Производство и рынок потребления АУ промышленного назначения целесообразно организовывать в промышленно развитых и перспективных регионах, где потребность в этой продукции велика, а спрос является неудовлетворенным.

4. Производство торфяных углей является инвестиционно привлекательным. В этой области необходимо частно-государственное партнерство.

5. Производство и расширение рынка активных углей из торфа способствует появлению новых рабочих мест, развитию и диверсификации производства в торфяной отрасли.

6. Необходимо строительство новых производств не только на основе химической, но и экологически чистой паровоздушной активации.

7. Реализация существующей Федеральной программы организации производств активного угля на действующих и вновь создаваемых торфопредприятиях позволит решить проблему его дефицита в России и осуществить импортозамещение такого необходимого продукта как активный уголь.

8. Если будет создана и отработана промышленная технология получения торфяного кокса, то в результате такая технология и оборудование коренным образом изменит экономику современной металлургии. Завершится эпоха «грязной» стали, т.к. торфяной кокс не привносит в чугун загрязняющих веществ.

9. Не потребуется дорогостоящих операций по извлечению сернистых, фосфорных соединений. Экономия при этом может составить до 20% стоимости стали.

10. Производство каменноугольного кокса является одним из самых экологически неблагоприятных производств. Технология получения кокса из торфа является экологически чистой.

11. В отличие от коксующихся углей, добыча торфа ведется открытым способом, инфраструктура хорошо развита. Коксующиеся угли добывают шахтным способом.

12. Ожидаемая себестоимость торфяного кокса ~800 руб/т, что значительно ниже себестоимости каменноугольного.

## **6 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР**

Проведен аналитический обзор информационных источников по ресурсным базам торфа в России, существующих технологий переработки торфа.

При этом рекомендуются следующие области применения полученных результатов.

– Перспектива торфяной отрасли заключается в повышении степени предварительной первичной переработки торфа на основе современных технологий, например, производство торфяных брикетов.

– Другим перспективным направлением является разработка технологии и оборудования для производства торфяных гранул и торфяного кокса.

– В настоящее время в России отсутствует широкомасштабное производство современного оборудования для газификации и пиролиза торфа, производства торфяного кокса, активного угля и приготовления торфяных гранул. Зарубежное оборудование чрезмерно дорого и по ряду параметров не соответствует российским условиям. Совершенно очевидно, что требуется разработка собственного оборудования.

В России одним из прогрессивных регионов России по добыче и применению торфа считается Ленобласть. По данным ВНИИ торфяной промышленности, научно обоснованный уровень производства торфа в области составляет 2,6 млн тонн в год при реальной добыче около 350 тыс. тонн. В 2001 году на программу его добычи ассигновано 12 млн рублей, а на программу повышения плодородия почв - 8 млн рублей.

Торф применяется в регионе в качестве топлива для ГРЭС-8, для котельных пяти районов, покупает его население, торф используется в качестве компоста, в теплицах (для грунтования и выпуска горшочков и пр.). Нашлось применение торфу и в дорожном строительстве, а также в благоустройстве.

Котельная установка на торфе используется для получения тепловой энергии за счёт сжигания биотоплива, теплоснабжения производственных зданий, технологических помещений при температуре теплоносителя в пределах 95–115°C.

Современная котельная на торфе имеет большую продуктивность и высокий КПД при незначительных затратах топлива. За счёт особенностей конструкции и использования современных технологий строительства котельных все теплотери сокращены до минимума. Котлы на торфе оборудованы защитой внешнего корпуса от перегрева.

Котельные, работающие на традиционных видах топлива (уголь, мазут, газ) необходимо и экономически оправданно перевести на местные виды топлива. С этой целью необходимо создание и тиражирование современных котлов, работающих в автоматическом режиме на генераторном газе (продукт газификации торфа) либо на торфяных гранулах (продукт первичной переработки торфа). Следует добавить, что помимо использования в местных котельных торфяные гранулы, удовлетворяющие требованиям евростандартов, являются продуктом экспорта, не уступающим по конкурентоспособности углю и жидкому топливу.

Объем котельных, работающих на торфяном топливе с влажностью 40-50% очень мал. Поэтому более целесообразно переводить уже имеющиеся котельные, работающие на природном газе, на генераторный газ. Как показывает практика, этот перевод не требует затрат по переоборудованию или монтажу котельных.

Перспективным является разработка технологий и оборудования для производства торфяного металлургического кокса.

Кокс металлургический применяют для выплавки чугуна (доменный кокс) как высококачественное бездымное топливо, восстановитель железной руды, разрыхлитель шихтовых материалов. Кокс металлургический используют также как ваграночное топливо в литейном



производстве (литейный кокс), для бытовых целей (бытовой кокс), в химической и ферросплавной отраслях промышленности (специальные виды кокса). Доменный кокс должен иметь размеры кусков не менее 25—40 мм при ограниченном содержании кусков менее 25 мм (не более 3 %) и более 80 мм. Литейный кокс по размерам кусков крупнее доменного; наиболее пригоден продукт, в котором присутствуют куски менее 60—80 мм. Главное отличие литейного кокса от доменного — малое содержание S, которое не должно превышать 1 % (в доменном коксе до 2 %).. Во всех производствах лучшее сырье — наиболее прочный малозольный и малосернистый кокс, содержащий небольшое количество мелких фракций.

К настоящему времени запасы коксующихся углей в России истощаются, а потребность в металлургическом коксе велика. У нас в стране имеются большие запасы торфа, пригодного для производства кокса. По своим свойствам торфяной кокс отличается в выгодную сторону от каменноугольного. Исходный материал— торф—содержит ничтожные количества серы и фосфора, что обуславливает почти полное отсутствие в коксе этих вредных для металлургии элементов. Специфической особенностью торфяного кокса является его высокая реакционная способность, существенно превышающая этот показатель каменноугольного. Это обстоятельство имеет большое значение для доменного процесса и производства высококачественных специальных сплавов.

Производство активных углей из кокса находится как у нас в стране, так и за рубежом в начальной стадии развития. Между тем, разнообразие торфов и их свойств позволяет получать качественные и дешевые активные угли.

В настоящее время активированный уголь используется во многих процессах очистки воды, пищевой промышленности, в процессах химических технологий. Кроме того, очистка отходящих газов и сточных вод основана главным образом на адсорбции активированным углем. А с

развитием атомных технологий, активированный уголь является основным адсорбентом радиоактивных газов и сточных вод на атомных электростанциях. В 20 веке применение активированного угля появилось в сложных медицинских процессах, например, гемофильтрация (очистка крови на активированном угле).

Активированные угли могут быть получены из разнообразного углеродсодержащего сырья - древесины, каменного и бурого угля, торфа и т. п.

В промышленном производстве активированных углей в качестве сырья чаще всего используются каменный уголь, скорлупа кокосовых орехов и древесина.

Сначала углеродсодержащее сырье подвергают карбонизации - обжигу при высокой температуре в инертной атмосфере без доступа воздуха. Однако полученный карбонизат обладает плохими адсорбционными свойствами, поскольку размеры его пор невелики и внутренняя площадь поверхности мала. Поэтому карбонизат подвергают активации для получения специфической структуры пор и улучшения адсорбционных свойств.

Для производства активированного угля используют печи различного типа и конструкции. Наибольшее распространение получили: многополочные, шахтные, горизонтальные и вертикальные печи, а также реакторы с кипящим слоем.

Ниже приведены основные сферы применения активированного угля:

- Очистка воды питьевой и технологической
- Очистка сточных вод
- Очистка воздуха и газоздушных выбросов
- Применение активированного угля в химической промышленности
- Применение активированного угля для рекуперации растворителей

- Применение активированного угля в медицине (для очистки организма от токсинов, бактерий, очистке крови)

- Использование активированного угля для добычи золота

- Использование активированного угля в атомной промышленности

Разработана математическая модель пиролиза крупных частиц торфа. В качестве кинетической схемы выбраны схемы с брутто-реакциями без детальной кинетики. Выбраны основные константы модели. Проведены оценочные расчеты по разработанной модели в широком диапазоне температур. Расчеты показали, что увеличение характерного размера пиролизуемых частиц более 0,01 м приводит к существенному увеличению времени пиролиза, что связано со сдвигом процесса в диффузионную область. Время пиролиза частиц радиуса 0,01 м составляет 1 ч при температуре окружающей среды 573 К. Разработанный механизм математического моделирования можно рекомендовать не только для торфа, но и других видов биомассы при термохимической переработке.

В настоящее время в стране отсутствует широкомасштабное производство современного оборудования для газификации и пиролиза торфа, производства торфяного кокса, активного угля и приготовления торфяных гранул. Зарубежное оборудование чрезмерно дорого и по ряду параметров не соответствует российским условиям. Совершенно очевидно, что требуется разработка собственного оборудования.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность предложенных конструкций основного технологического оборудования при комплексной переработке торфа с получением высококалорийного топлива и углеродных материалов. Высокая эффективность процессов тепло- и массообмена обеспечена применением локально псевдооживленных слоев во всех аппаратах разработанной экспериментальной установки. Такие конструкции могут быть использованы в энергетике, химической промышленности, в

промышленности строительных материалов (производство извести, цементного клинкера и т.д.).

Ниже приведена оценка экономической эффективности использования торфа для производства активного угля.

### **Оценка необходимых капитальных затрат**

Величина капитальных затрат на создание основного технологического оборудования, на строительство установки оценены на основании работ, выполненных Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Данная организация проводит систематические работы по созданию современной технологии производства древесного угля для стран, являющихся традиционными потребителями этого вида топлива в бытовом секторе, прежде всего для Южной и Юго-Восточной Азии.

Детальные исследования FAO позволяют достаточно точно оценить составляющие затрат, связанных с основным технологическим процессом - глубоким пиролизом торфа и получением газообразного топлива для установок различной производительности.

По условиям технической совместимости с предлагаемым процессом термической переработки торфа выполненные ниже экономические расчеты базируются на показателях технологии с футерованными ретортами. В расчетах использовалась величина производительности по условному углеродному материалу, который можно было бы получить из того количества торфа, которое необходимо для получения АУ.

### **Удельные капитальные затраты (УКЗ)**

Методика расчета основана на известной степенной зависимости УКЗ от производительности установки. Эта зависимость представлена уравнением:

$$\text{УКЗ} = 11743X^{-0,474}$$

УКЗ – удельные капитальные затраты, \$/т

X – мощность установки по углеродному материалу (коксу), т/год

Мощность установки по коксу  $X=3300$  т/год (420 кг/ч – см. ниже расчет установки)

По приведенной выше формуле  $УКЗ=\$252/т.$

Инвестиции в строительство установки

$$S=252 \cdot 3300=\$832000$$

С учетом дополнительных инвестиций на строительство модуля активации инвестиции составят \$1,5 млн.

Годовое производство активного угля

$$N=0,170 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0,9=1340 \text{ т/год}$$

При цене АУ марки БАУ \$2500/т выручка составит

$$2500 \cdot 1340=\$3,350 \text{ млн руб./год.}$$

Простой срок окупаемости составляет 0,45 года.

Таким образом, использование торфа для производства АУ является проектом высокой инвестиционной привлекательности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В процессе выполнения НИР получены следующие **основные результаты**:

1. Проведен аналитический обзор информационных источников по ресурсным базам торфа в России, существующих технологий переработки торфа.

Торф перспективным сырьём для топливно-энергетической отрасли и свидетельствуют о необходимости возрождения и развития в современных условиях торфяной промышленности России.

В настоящее время в России отсутствует широкомасштабное производство современного оборудования для газификации и пиролиза торфа, производства торфяного кокса, активного угля и приготовления торфяных гранул. Зарубежное оборудование чрезмерно дорого и по ряду параметров не соответствует российским условиям.

2. Проведен патентный поиск по ГОСТ 15.011-96

Результаты проведенного патентно-информационного исследования свидетельствуют о перспективности исследований в области безотходной термической переработки биомассы, в частности торфа. Обнаруженные патенты, относящиеся к объектам исследований, свидетельствуют о том, что в настоящее время существует определенный задел в научных исследованиях. При этом разработки в этой области продолжаются, о чем свидетельствует большая изобретательская активность.

3. Проведено математическое моделирование процессов карбонизации торфа с получением высококалорийного топлива, кокса, процесса упрочнения кокса и активации продуктов карбонизации с получением АУ, в т.ч.:

Сопоставление результатов численного моделирования процесса карбонизации торфа и процесса получения пироуглерода с соответствующими экспериментальными данными, полученными на макетных установках, показали адекватность разработанных

математических моделей. В целом достигнуто как качественное, так и количественное согласие по основным параметрам процессов. Полученное согласие дает возможность использовать разработанные математические модели для более детального исследования (зачастую недоступного в эксперименте) и понимания процессов, происходящих в реакционной зоне. Полученные результаты могут быть положены в основу расчета технологических процессов пиролиза органического сырья и конструирования промышленных установок по его переработке.

Получены основные энергетические и массовые характеристики различных процессов переработки торфа (карбонизация, пиролиз, крекинг).

4. Создана экспериментальная установка по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей и проведены экспериментальные исследования.

Полученные результаты экспериментов позволяют утверждать, что после доработки аппаратов качество продуктов улучшилось. Требования к номенклатуре параметров, приведенные в техническом задании к Госконтракту, выполнены.

5. Разработан проект технического задания для проведения последующих ОКР по теме «Создание производства установок по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей»

На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости продолжения работ и перевода ее в стадию ОКР. Для этого необходимо разработать техническое задание на разработку типоразмерного ряда автоматизированных и механизированных установок по комплексной переработке торфа.

6. Проведены исследования по применению результатов НИР

Высокая эффективность процессов тепло- и массообмена обеспечена применением локально псевдооживленных слоев во всех аппаратах разработанной экспериментальной установки. Такие конструкции могут быть использованы в энергетике, химической промышленности, в промышленности строительных материалов (производство извести, цементного клинкера и т.д.).



**ПРИЛОЖЕНИЕ А -  
ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**



**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**  
на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР) по теме:  
«Создание производства установок по комплексной безотходной  
термохимической переработке торфа с получением высококалорийного  
экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных  
углей»

**Руководитель работы**

В.М. Зайченко

**Ответственный исполнитель**

М.А. Коростина

## **1. Цель выполнения ОКР**

Целью проведения работ является разработка конструкторской документации установки производства активного угля из торфа производительностью 170 кг/ч.

## **2. Назначение продукции**

Назначение проведения работ: проведение последующих ОКР по теме «Создание производства установок по комплексной безотходной термохимической переработки торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей».

## **3. Технические требования**

### **3.1. Состав продукции**

Установка должна включать:

- Сушилку исходного торфа
- Предкарбонизатор (дегидрататор)
- Карбонизатор
- Активатор
- Топки сушилки и активатора с горелочными устройствами
- Тяго-дутьевое и дозирующее оборудование
- Пылеулавливающее оборудование
- Диагностическую аппаратуру, средства автоматики и управления

### **3.2. Требования к показателям назначения**

#### **3.2.1. Выполняемые функции**

Установка по комплексной безотходной термохимической переработке торфа с получением высококалорийного экологически чистого энергетического топлива, кокса и активированных углей.

В химической промышленности используются установки для производства активного угля, в металлургии пироуглерода и кокса, в

энергетике – кокс в качестве твердого топлива, в т.ч. кокс как топливо в частных домовладениях и газообразные продукты в качестве топлива.

### **3.2.2. Нормы и количественные показатели**

Энергетическое топливо, получаемое в установке, должно содержать минимальное количество поллютантов. Сжигание такого топлива в топках установки должно быть оптимизировано с целью минимизации экологически вредных выбросов. Содержание поллютантов в выхлопных газах должно не превышать  $0,1 \div 0,2$  ПДК по СО и NO<sub>x</sub>.

### **3.2.3. Технические характеристики (параметры)**

Производительность установки должна быть не менее 170 кг/ч по активному углю.

Теплотворная способность твердого топлива (кокса) должна быть не менее 29,4 МДж/кг (7000 ккал/кг).

Теплотворная способность газообразного топлива должна быть не менее 10,4 МДж/нм<sup>3</sup> (2500 ккал/нм<sup>3</sup>)

### **3.2.4. Требования к порядку и способам взаимодействия с сопрягаемыми объектами**

С целью обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации установки предполагается полная автоматизация технологического процесса с высоким уровнем контроля и диагностирования наиболее важных узлов и параметров. АСУ ТП должна быть выполнена на базе ПК и обеспечивать работу установки на всех возможных режимах без присутствия обслуживающего персонала. Состав оборудования комплекса должен позволять автоматизировать процесс подготовки к пуску, пуск и работу на всех возможных режимах. Управление осуществляется с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ). Команды, вырабатываемые АРМ, через программу контроллера, реализующую алгоритм управления, поступают на исполнительные механизмы и устройства комплекса. Должно быть предусмотрено два режима работы: автоматический и

полуавтоматический. При автоматическом режиме все технологические операции осуществляются без участия оператора.

### **3.3. Требования надежности**

Во всех аппаратах установки (реакторах) должны быть предусмотрены взрывные клапаны.

#### **3.3.1. Критерии отказов и предельного состояния изделия**

Автоматика установки должна обеспечивать прекращение подачи газов при:

- погасании пламени у горелки;
- прекращении подачи электроэнергии или исчезновении напряжения на устройствах дистанционного и автоматического управления и средствах измерения;
- неисправности КИП, средств автоматизации и сигнализации;
- появлении загазованности, обнаружении утечки газа на газовом оборудовании и внутренних газопроводах;
- взрывегазовоздушных смесей и пожаре на объекте;
- превышении температуры отходящих газов свыше 250°C;
- превышении температуры стального корпуса свыше 200°C;
- повышении температуры наружной стенки реакторов свыше 55°C (при компоновке установки в здании).

### **3.4. Конструктивные требования**

Компоновочные решения модуля должны обеспечивать компактность всей установки, минимизацию протяженности коммуникаций. Использование жаропрочных конструкционных материалов необходимо минимизировать. Должна быть обеспечена герметизация газовых магистралей. Конструкции сушилки, предкарбонизатора, карбонизатора и активатора должны обеспечивать их ремонтпригодность.

### **3.5. Требования по эргономике и технической эстетике**

Разрабатываемая установка комплексной переработки торфа должна быть полностью автоматизирована с дублированием на ручное управление с дисплейным отображением информации и хранением на глубину до шести месяцев.

Режим работы установки непрерывный с восьмичасовым рабочим днем.

Эргономика должна соответствовать группе ГОСТов «Система «Человек-машина»».

### **3.6. Требования безопасности**

В соответствии с требованием Федерального закона "О промышленной безопасности" установка относится к категории опасных производственных объектов и подлежит регистрации в установленном порядке. В соответствии с Приложением 2 Закона разработка декларации не является обязательной, т.к. масса топлива на промплощадке собственно установки много меньше допустимого уровня, который составляет 200 т.

Основные технические решения по созданию установки (в части технологии термохимической обработки, выбора состава и параметров оборудования и систем обеспечения, режимов работы установки, компоновочных решений и др.) необходимо разработать в соответствии с положениями закона РФ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" в соответствии принятым в РФ нормам охраны труда, экологической и пожарной безопасности, охраны окружающей среды, а также охраны населения прилегающих территорий и самих территорий от чрезвычайных ситуаций.

### **3.7. Требования к упаковке, маркировке, транспортированию, условиям хранения продукции**

Установки перевозятся всеми видами транспорта в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта. Транспортная маркировка грузовых мест – по ГОСТ 14192 – 96 «Маркировка грузов». Транспортирование установок в части воздействия

климатических факторов по группе Ж1 ГОСТ 15150 69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия факторов внешней среды». Хранение установок – по группе ОЖЗ ГОСТ 15150 69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия факторов внешней среды».

### **3.8. Требования стандартизации, унификации и каталогизации**

Используемое оборудование и средства диагностики должны быть стандартизованы и преимущественно отечественного изготовления.

Тяго-дутьевое и дозирующее оборудование, элементы средств контроля и управления должны быть стандартизованы и в максимальной степени отечественного производства.

## **4. Требования по видам обеспечения**

### **4.1. Требования по метрологическому обеспечению**

Система контроля и измерения параметров установки должна обеспечить сбор данных для анализа эксплуатационных режимов работы установки и ее экологических характеристик. Измерению подлежат: температуры в характерных точках обрабатываемого материала и горячей стенки в различных аппаратах, температуры и состав газовой смеси на выходе из горелочного устройства, на выходе из установки, температура наружной поверхности аппаратов, концентрация NOx в уходящих газах и пожароопасных продуктов в помещении.

### **4.2. Требования к разработке программного обеспечения**

Текст программ в соответствии с ГОСТ 19.401-78.

### **4.3. Требования к документации**

Техническая документация должна быть выполнена в соответствии с требованиями ЕСКД.

Описание программ в соответствии с ГОСТ 19.402-78.

Описание применения в соответствии с ГОСТ 19.502-78.

Руководство оператора в соответствии с ГОСТ 19.505-79.

## **5. Специальные требования**

### **5.1. Требования к испытаниям**

Для подтверждения соответствия разрабатываемого оборудования требованиям настоящего технического задания и нормативно-технической документации должны быть проведены следующие испытания:

1) исследовательские испытания с целью изучения определенных характеристик экспериментальных партий продукции в зависимости от вариации режимов и параметров технологического процесса;

2) предварительные испытания с целью предварительной оценки соответствия конструкторско-технологической документации и опытной партии продукции, изготовленной по разработанной конструкторской документации, требованиям настоящего технического задания, а также определения готовности вновь разработанного и изготовленного опытного оборудования к опытной эксплуатации;

3) опытная эксплуатация с целью оценки соответствия конструкторско-технологической документации и опытной партии продукции требованиям настоящего технического задания, а также определения готовности конструкторско-технологической документации и вновь изготовленного опытного оборудования к приемочным (опытно-промышленным) испытаниям;

4) приемочные (опытно-промышленные) испытания для оценки соответствия разработанных и изготовленных опытных образцов оборудования и конструкторско-технологической документации всем заданным к ним требованиям настоящего технического задания в условиях, максимально приближенных к условиям реального производства, проверки и подтверждения соответствия конструкторско-технологической документации и опытной партии продукции требованиям настоящего технического задания, а также определения целесообразности

использования конструкторско-технологической документации для промышленного производства и реализации продукции.

Для проведения каждого вида испытаний должна быть разработана Программа и методики испытаний.

Программа и методики приемочных (опытно-промышленных) испытаний должна быть согласована с Министерством образования и науки Российской Федерации.

## **6. Техничко-экономические требования**

Величина капитальных затрат на создание основного технологического оборудования, на строительство установки оценены на основании работ, выполненных Foodand Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Данная организация проводит систематические работы по созданию современной технологии производства древесного угля для стран, являющихся традиционными потребителями этого вида топлива в бытовом секторе, прежде всего для Южной и Юго-Восточной Азии.

Детальные исследования FAO позволяют достаточно точно оценить составляющие затрат, связанных с основным технологическим процессом - глубоким пиролизом торфа и получением газообразного топлива для установок различной производительности.

По условиям технической совместимости с предлагаемым процессом термической переработки торфа выполненные ниже экономические расчеты базируются на показателях технологии с футерованными ретортами. В расчетах использовалась величина производительности по условному углеродному материалу, который можно было бы получить из того количества торфа, которое необходимо для получения АУ.

### **Удельные капитальные затраты (УКЗ)**

Методика расчета основана на известной степенной зависимости УКЗ от производительности установки. Эта зависимость представлена уравнением:



$$УКЗ=11743X^{-0,474}$$

УКЗ – удельные капитальные затраты, \$/т

X– мощность установки по углеродному материалу (коксу), т/год

Мощность установки по коксу X=3300 т/год (420 кг/ч–см. ниже расчет установки)

По приведенной выше формуле  $УКЗ=\$252/т$ .

Инвестиции в строительство установки

$$S=252 \cdot 3300=\$832000$$

С учетом дополнительных инвестиций на строительство модуля активации инвестиции составят \$1,5 млн.

Годовое производство активного угля

$$N=0,170 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0,9=1340 \text{ т/год}$$

При цене АУ марки БАУ \$2000/т выручка составит  $2000 \cdot 1340=\$2,68$  млн/год.

Эксплуатационные расходы (земля, топливо, зарплата, амортизационные отчисления, налог на прибыль и т.д.) \$1,9 млн.

Чистая прибыль \$0,77 млн.

Срок окупаемости 2 года.

Таким образом, использование торфа для производства АУ является проектом высокой инвестиционной привлекательности.

## **7. Требования к патентной чистоте и патентоспособности**

Должны быть проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

Должны быть определена рыночная стоимость интеллектуальной собственности в соответствии с Методическими рекомендациями, утвержденными Министерством имущественных отношений 26 ноября 2002 г. № СК-4/21297.

Патентная чистота на конструктивные и технологические решения должна быть обеспечена в отношении Российской Федерации и стран, куда

возможна поставка изделия, а также передача технической, информационной и другой документации.

## **8. Перечень, содержание, сроки выполнения работ.**

### **8.1. Наименование этапов и выполняемые работы**

Этап 1. Техническое предложение.

Этап 2. Эскизный проект.

Этап 3. Технический проект.

Этап 4. Разработка конструкторской документации.

Этап 5. Изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний.

Этап 6. Проведение приемочных испытаний.

## Приложение 1.

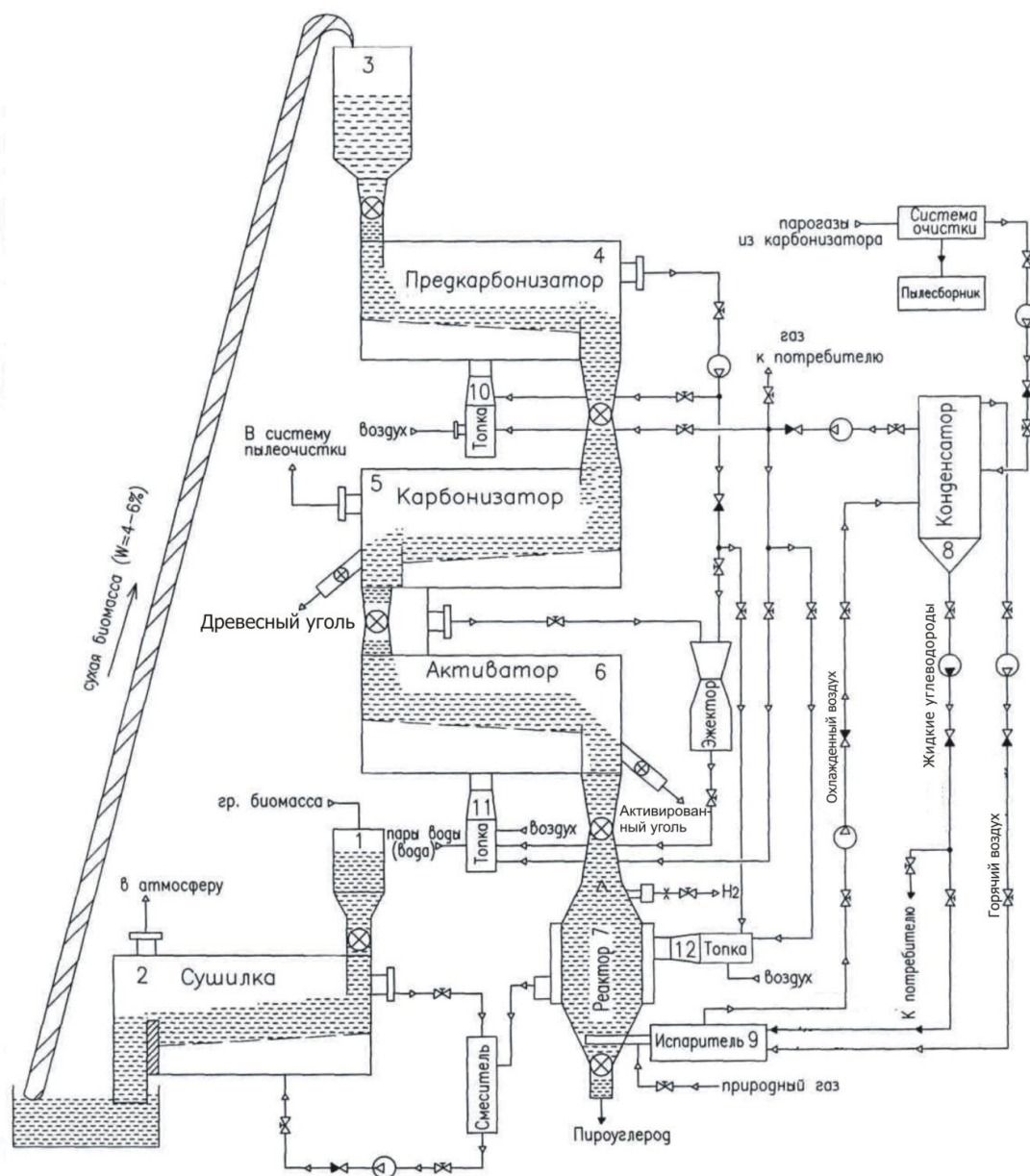


Рисунок 1 - Базовая схема комплексной гибкой технологии переработки торфа

Гранулированный торф подают из расходного бункера 1 в сушилку 2, из нее в расходный бункер 3 предкарбонизатора 4, твердый материал из предкарбонизатора в карбонизатор 5, угольный остаток из последнего в активатор 6, из активатора в реактор науглероживания 7. На выходе из

карбонизатора 5 и активатора 6 выполнены выпускные парубки со шлюзовыми затворами для возможного выпуска в необходимом количестве древесного угля (кокса) и/или активного углей. Газы из карбонизатора 5 подаются через систему пылеочистки в конденсатор 8 жидких высокомолекулярных углеводородов, все жидкие высокомолекулярные углеводороды или их часть подают в испаритель 9, а из него пары жидких высокомолекулярных углеводородов направляют в реактор науглероживания 7 с некоторым избыточным давлением. В реакторе 7 осуществляют разложение паров жидких высокомолекулярных углеводородов на углерод и водород и науглероживание пористой структуры активного угля. Неконденсирующиеся газы из конденсатора направляют в топки 10,11 и 12 соответственно предкарбонизатора, активатора и системы обогрева реактора науглероживания. Продукты сгорания из системы обогрева реактора науглероживания подают в смеситель, куда подают также газы рецикла из сушилки для получения сушильного агента необходимых параметров. Аналогично осуществляют рецикл газов предкарбонизатора и активатора.

Твердый продукт – пироуглерод – выводят из реактора 7 через шлюзовой или аэродинамический затвор, а технический водород – по автономному тракту с регулируемым аэродинамическим сопротивлением.

При переходе к тому или иному сочетанию конечных продуктов осуществляют минимальную переналадку оборудования: уменьшают или увеличивают высоту порогов, определяющих высоту слоя в аппаратах 5,6 и тем самым времена пребывания твердого материала и парогазов в слое. Температуру материала регулируют расходом топливных газов, подающихся в топку аппаратов.

Предлагаемый способ иллюстрируется следующими примерами, в которых в качестве биомассы подразумевается древесная биомасса, что не ограничивает использование других видов биомассы, в частности, торфа.

Первый пример – получение пироуглерода, водорода и энергетического топлива.

В нем организуется функционирование установки без получения промежуточных углеродных материалов—кокса и активного угля. Шлюзовые затворы выпускных патрубков карбонизатора и активатора закрыты, а весь активный уголь подается в реактор науглероживания. Все жидкие высокомолекулярные углеводороды или их часть из конденсатора подаются в испаритель насосом, создающим необходимое избыточное давление. В испарителе образуются перегретые пары углеводородов, которые направляются в реактор науглероживания, где они охлаждают нижние слои пироуглерода, а в верхних происходит их термическая диссоциация на поверхности пор пористой угольной матрицы активного угля. Углерод углеводородов осаждается в порах в виде пироуглерода, а водород вместе с некоторым малым количеством неразложившихся углеводородов поступает в межзерновое пространство и эвакуируется из установки по автономному тракту. Так как скорость образования пироуглерода пропорциональна давлению паров углеводородов в реакторе, то предпочтительно создавать в реакторе избыточное давление. При необходимости большой степени науглероживания угольной матрицы в реактор подают определенное количество природных углеводородов, например, природного газа.

Для компенсации эндотермического эффекта диссоциации углеводородов реактор оборудован системой внешнего обогрева продуктами сгорания неконденсирующихся газов. Продукты сгорания из системы обогрева подаются в смеситель, куда подаются также газы рецикла из сушилки. В смесителе формируется сушильный агент необходимых параметров.

Второй пример – получение кокса(твердого топлива) и/или активного угля, энергетических топлив, пироуглерода и технического водорода.

Шлюзовые затворы выпускных патрубков карбонизатора и активатора открыты для возможного вывода из системы части кокса и активного угля. Возможно сочетание вариантов, когда выпускной патрубок активатора закрыт, а карбонизатора открыт или наоборот. Во всех вариантах определенное количество древесного угля (кокса) поступает в активатор, а из него активный уголь поступает в реактор науглероживания. Активатор оборудован топкой для сжигания неконденсирующихся газов карбонизации, поступающих из конденсатора. Часть газов на выходе из активатора подается на рецикл через инжектор, а большая часть поступает под наклонную решетку карбонизатора для осуществления процесса карбонизации. Часть древесного и/или активного углей через выпускные патрубки подается внешним потребителям.

**Во всех примерах** газы из карбонизатора поступают в систему пылеочистки (например, в высокотемпературные рукавные фильтры), а из нее – в конденсатор высокомолекулярных углеводородов. Количества жидкого топлива и неконденсирующихся топливных газов определяются управлением параметрами карбонизатора.

Достоинством предлагаемой технологии является гибкость по конечным целевым продуктам, отказ или сокращение использования природных невозобновляемых источников углеводородов, а также сокращение выбросов в атмосферу парникового углекислого газа при производстве технического водорода по сравнению с традиционными способами его производства.

## Приложение 2

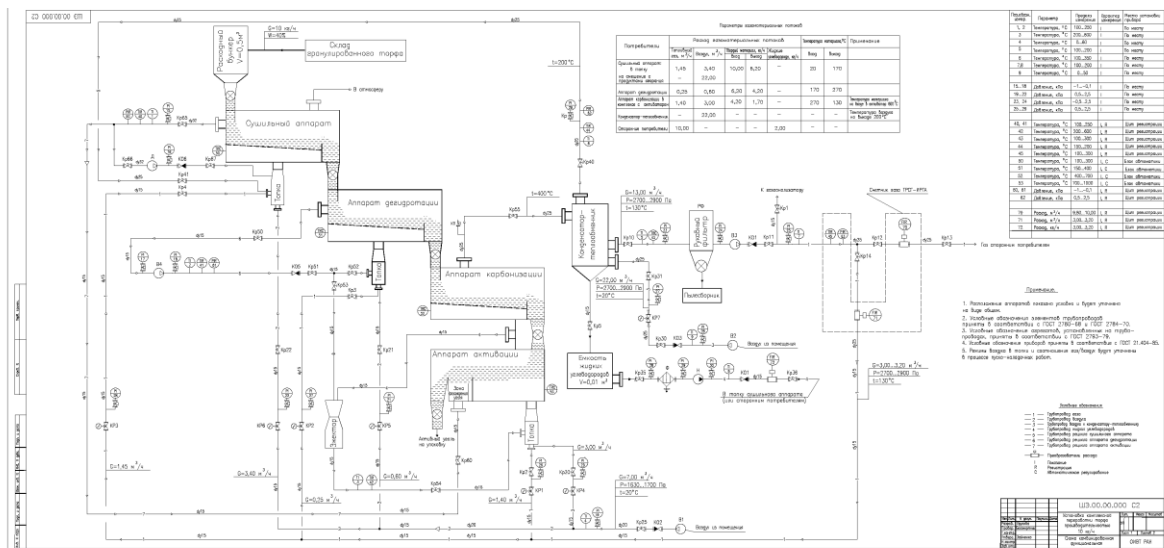


Рисунок 2 - Принципиальная технологическая схема

Описание технологической схемы производства активного угля, представленной на рисунке 2.

### 1. Движение и параметры твердого материала

На участке приготовления исходного торфа готовится сырье с параметрами:

- влажность, масс % 40
- производительность, кг/ч 1000

Из участка приготовления материал подается в расходный бункер сушилки (оборудование для транспорта всех твердых материалов будет выбираться при проектировании; предположительно – пружинные (винтовые транспортеры фирмы «Европейские транспортные системы»).

Из расходного бункера влажное сырье через шлюзовой затвор подается в сушильный аппарат, в котором перемещается к разгрузочному узлу по наклонной беспровальной решетке.

Параметры торфа на выходе из сушилки:

- остаточная влажность, масс % 4
- расход, кг/ч 625
- температура, °C 180

–паропроизводительность, кг/ч 375

Из сушилки подсушенный материал подается в аппарат дегидратации (предкарбонизации), в котором из материала удаляется остаточная физическая и связанная влага, а также некоторое количество низкомолекулярных углеводородов, которые в свою очередь могут разлагаться на более простые соединения ( $C_mH_n$ , пары воды и т.д.).

Параметры материала на выходе из предкарбонизатора:

–расход, кг/ч 420

–температура, °С 270

Из аппарата дегидратации материал подается в карбонизатор, в котором из материала выделяются почти все летучие и образуется пористый материал-кокс.

Параметры на выходе из карбонизатора:

–расход, кг/ч 200

–температура, °С 600

Из карбонизатора кокс подается в активатор, в котором образуется активный уголь (АУ) при реагировании кокса с парами воды и диоксидом углерода. Необходимо подчеркнуть, что процессы в активаторе и карбонизаторе происходят в безокислительной (восстановительной) среде.

В активаторе предусмотрена зона охлаждения АУ газами из сушилки.

Параметры твердого материала в активаторе:

–расход на выходе, кг/ч 170

–температура на выходе, °С 130

–максимальная температура, °С 850

## 2. Движение и параметры газовых потоков

### Процесс сушки

В топке сушилки и в узле смешения продуктов сгорания формируется сушильный агент в необходимом количестве и необходимой температуры.



Из конденсатора жидких углеводородов в узел смешения подается нагретый до  $\sim 200$  °С воздух, охлаждающий газы карбонизации до  $\sim 130$  °С.

Часть отработанного сушильного агента выбрасывается в атмосферу, а большая часть направляется в рецикл для обеспечения заданной температуры. Часть газов направляется в зону охлаждения АУ.

Параметры газовых потоков:

–температура сушильного агента на выходе, °С	110
–температура на входе, °С	200
–расход топлива в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	141
–расход воздуха в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	313
–рецикл в узел смешения, $\text{нм}^3/\text{ч}$	6740
–расход в зону охлаждения АУ, $\text{нм}^3/\text{ч}$	200
– расход в атмосферу, $\text{нм}^3/\text{ч}$	2250

Предкарбонизатор (аппарат дегидратации)

Теплоноситель также формируется в топке и в узле смешения продуктов сгорания и газов рецикла.

Параметры газовых потоков:

–температура теплоносителя на выходе, °С	200
–температура на входе, °С	280
–расход топлива в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	24
–расход воздуха в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	53
–рецикл в узел смешения, $\text{нм}^3/\text{ч}$	750
–расход в эжектор (активатор), $\text{нм}^3/\text{ч}$	330

Активатор

Параметры газовых потоков:

–температура на выходе, °С	650
–температура на входе, °С	900
–расход топлива в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	139
–расход воздуха в топку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	309

–рецикл в узел смешения из эжектора,  $\text{нм}^3/\text{ч}$   
 $200+330+175=705$

–расход в карбонизатор,  $\text{нм}^3/\text{ч}$  850

– расход в рецикл на эжектор,  $\text{нм}^3/\text{ч}$  175

### Карбонизатор

#### Параметры газовых потоков:

–температура на выходе,  $^{\circ}\text{C}$  380÷400

–температура на входе,  $^{\circ}\text{C}$  650

–расход на выходе (в конденсатор),  $\text{нм}^3/\text{ч}$  1100÷1300

#### Тракт охлаждения и очистки газов

Горючие газы на выходе из карбонизатора имеют достаточно высокую температуру и содержат некоторое количество пыли и смолистых веществ.

Для удаления смол газы направляются в конденсатор-теплообменник, где они охлаждаются воздухом до температуры  $\sim 130\div 150$   $^{\circ}\text{C}$ . Конденсат (жидкие углеводороды) собирается в емкость и направляются или в топку сушилки или сторонним потребителям.

Охлажденные и очищенные от конденсирующихся паров тяжелых углеводородов газы направляются на очистку от твердых частиц пыли в рукавный фильтр.

После очистки часть газов направляется на внутреннее технологическое потребление в топки аппаратов, а часть— сторонним потребителям.

Технологический процесс предполагается осуществить максимально автоматизированным, поэтому технологическая линия снабжена запорной и регулирующей арматурой с возможностью автоматизированного управления (см. ведомость оборудования, арматуры и КИП к технологической схеме в составе эскизного проекта).

Приведенные выше параметры газоматериальных потоков уточняются в процессе пуско-наладочных работ.

## **Теплотехнологический расчет установки производства активного угля**

Расчет производится для определения параметров потоков газообразных и твердых веществ, образующихся в результате физико-химических превращений торфа при его термической обработке.

Параметры твердого материала (температура, потеря массы в аппаратах) приняты на основании экспериментальных исследований, выполненных в ОИВТ РАН.

Результаты расчетов используются для выбора тяго-дутьевых устройств, контрольно-измерительных приборов и при разработке конструкторской документации на нестандартизированное технологическое оборудование.

### **1. Расчет процесса сушки.**

Исходные данные:

– Расход сухой биомассы, кг/ч	600
– Влажность биомассы исходная, %	40
– Влажность на выходе, %	4
– Температура сушильного агента, °С	
на входе	200
на выходе	110

#### Расчет

Количество тепла на удаление влаги

$$Q_{\text{вл}} = G_{\text{вл}} * J = 375 * 620 = 232500 \text{ ккал/ч, где}$$

$$G_{\text{вл1}} = 375 \text{ – вес удаляемой влаги, кг/ч}$$

$$G_{\text{вл2}} = 25 \text{ кг/ч – количество остаточной влаги}$$

$$G_{\text{вл}} = G_{\text{нач}} - G_{\text{кон}} = 400 - 25 = 375 \text{ кг/ч}$$

$$J \text{ – энтальпия водяного пара при } 110^\circ\text{С, ккал/кг}$$

Энтальпия водяного пара в расчете принята с учетом нагрева паров воды до  $110^\circ\text{С}$ .

Количество тепла на нагрев материала с 20°C до 180°C.

$$Q_{др} = 600 * 0,5 * 180 + 25 * 180 - 600 * 0,5 * 20 - 400 * 20 = 44500 \text{ ккал/ч,}$$

где  $C_T = 0,5$  ккал/кг.град – теплоемкость сухого торфа в интервале 20÷180 °C.

Суммарное количество тепла

$$\sum Q = Q_{вл} + Q_{др} = 277000 \text{ ккал/ч}$$

Расход сушильного агента

$$V_{са} = \sum Q / (t_{нач} - t_{кон}) * C = 277000 / (200 - 110) * 0,35 = 8794 \text{ нм}^3/\text{ч,}$$

где

$C = 0,35$  ккал/нм<sup>3</sup> – средняя теплоемкость сушильного агента.

Расчет расхода воздуха в конденсаторе

– выход горючих газов из карбонизатора 1275 нм<sup>3</sup>/ч

– температура и теплоемкость газов на входе 380 °C; 0,36 ккал/нм<sup>3</sup>·град

– температура и теплоемкость газов на выходе 130 °C; 0,35 ккал/нм<sup>3</sup>·град

– температура и теплоемкость воздуха на входе 20 °C; 0,31 ккал/нм<sup>3</sup>·град

– температура и теплоемкость воздуха на выходе 200 °C; 0,32 ккал/нм<sup>3</sup>·град

Тепловая мощность конденсатора

$Q = (0,36 * 380 - 0,35 * 130) * 1275 * 0,95 = 110600$  ккал/ч (с учетом 5% потерь)

Расход воздуха в конденсатор (воздух направляется в сушилку)

$$V_{вк} = 110600 / (0,32 * 200 - 0,31 * 20) = 1913 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Расход отработанного сушильного агента на охлаждение АУ

– температура и теплоемкость газов на входе в зону охлаждения 110°C; 0,35 ккал/кг.град

– температура и теплоемкость газов на выходе из зоны охлаждения

750<sup>0</sup>С; 0,38 ккал/кг.град

– расход, температура и теплоемкость АУ в активаторе

170 кг/ч; 800<sup>0</sup>С; 0,42 ккал/кг.град

– расход, температура и теплоемкость АУ на выходе

170 кг/ч; 120<sup>0</sup>С; 0,245 ккал/кг.град

Тепловая мощность зоны охлаждения

$$Q_{\text{ох}} = 170 \cdot 800 \cdot 0,42 - 170 \cdot 120 \cdot 0,245 = 52122 \text{ ккал/кг.град}$$

Необходимый расход отработанного сушильного агента

$$V_{\text{ох}} = 52122 \cdot 0,95 / (750 \cdot 0,38 - 110 \cdot 0,35) = 201 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Расход воздуха на горение в топку

В дальнейших расчетах расхода воздуха на горение использовалась приближенная формула Д.И. Менделеева для определения теплотворной способности топлива по его элементному составу. При использовании этой формулы не учитывается энергия разрыва связей в молекулах различных углеводородов, однако ее точность (5÷7%) вполне пригодна для практических инженерных расчетов. При использовании всего кислорода воздуха на горение выделяется  $\approx 900$  ккал/нм<sup>3</sup> воздуха.

Расход воздуха на горение в топку

$$V_{\text{вт}} = 281200 / 900 = 312 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Расход горючих газов, направляемых в топку сушилки:

- при теплотворной способности 2000 ккал/нм<sup>3</sup> –

$$V_{\text{г}} = 140,6 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Объем газов рецикла составит

$$V_{\text{рец}} = V_{\text{с.а}} - (V_{\text{г}} + V_{\text{вк}}) = 6740 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Объем выбрасываемых в атмосферу газов:

$$V_{\text{ух}} = (V_{\text{г}} + V_{\text{вк}} + G_{\text{вл}} / 0,804) = 140,6 + 1913 + 375 / 0,804 = 2520 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Примечание: предварительный расчет показывает, что при влажности торфа  $\approx 20\%$  производительность сушки составит около 1000 кг/ч.

Таблица 1.

## Тепловой баланс процесса сушки

№№ статей	Наименование статей прихода	Кол-во, ккал/ч	Наименование статей расхода	Кол-во, ккал/ч	Примеч.
1.	Теплота воздуха из конденсатора жидких углеводородов	121648	Теплота подсушенного материала	58500	
2.	Теплота влажного материала на входе	14000	Теплота испарения воды	232500	
3.	Теплота сгорания топлива	281200	Теплота газов, выбрасываемых в атмосферу	97276	Расход 2250 нм <sup>3</sup> /ч
			Теплота газов в зону охлаждения АУ	7738	
			Потери	20843	5%

Итого приход

416840

Итого расход

416857

Невязка баланса 17 ккал/ч

Аэродинамический расчет аппарата сушки.

Исходные данные:

– Объемный вес материала 310 ÷ 320 кг/м<sup>3</sup>– Средняя температура газов на верхнем “зеркале” материала сушки  
≈ 130°C

– Скорость газов на зеркале сушки принимаем 1,2 м/с.

– Время сушки – 30 мин.

## Расчет

Объем газов на зеркале сушки составит

$$V_{c.a} + V_{H_2O} = 8794 + 375 / 0,804 = 9260 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Исходя из скорости, площадь сечения зеркала сушки составит

$$F = 9260 * (273 + 130) / 3600 * 1,2 * 273 \sim 3,2 \text{ м}^2$$

Высота слоя составит примерно

$$H = 2 * 0,5 / 3,2 = 310 \text{ мм},$$

где 2 – объем  $\text{м}^3 / \text{ч}$  материала; 0,5 ч – время сушки.

## **2. Расчет аппарата дегидратации.**

Исходные данные:

– Расход материала на входе 625 кг/ч

– Расход материала на выходе 420 кг/ч (потеря массы 30% от абсолютно сухого материала)

– Влажность материала на входе 4%

– Температура материала на входе 170°C

на выходе 270°C

– Температура газов на входе 280°C

на выходе 200°C

– Время обработки 30 мин

## Расчет теплового баланса

Количество тепла на удаление свободной влаги

$$Q_{\text{вл}} = G_{\text{вл}} * J = 620 * 25 = 15500 \text{ ккал/ч}$$

По литературным данным (Левин Э.Д. Теоретические основы производства древесного угля. М., Лесная промышленность, 1980) при нагреве до 300 °С выделяется около 28 ккал/кг асд. Учитывая некоторое увеличение теплоты испарения химически связанной влаги по сравнению с теплотой испарения свободной (физической) влаги, принимаем тепловой эффект предкарбонизации равным нулю.

Количество тепла с материалом на выходе

$$Q_{\text{mat}2} = G * t_{\text{нач}} * C_m = 420 * 0,5 * 270 = 56700 \text{ ккал/ч}$$

Количество тепла с материалом на входе

$$Q_{\text{mat}1} = 58500 \text{ ккал/ч (см. баланс сушилки)}$$

Количество тепла на нагрев газов, выделяющихся при дегидратации от 170 до 280 °С:

$$Q_{\Gamma} = 0,36 * (625 - 420) * 110 = 8118 \text{ ккал/ч,}$$

где  $625 - 420 = 205 \text{ кг/ч} = 205 \text{ нм}^3/\text{ч}$  – количество газов, выделяющихся из материала.

Расход воздуха на горелку при  $\alpha = 1$  составит

$$V \approx 52 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Расход газов карбонизации

$$V = 24 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

#### Примечание

Согласно предварительным испытаниям потеря массы при нагреве с 170°С до 270°С составляет  $\approx 30\%$ , что соответствует литературным источникам, т.е. в основном удаляется связанная влага с небольшим количеством легколетучих (низкомолекулярных) углеводородов, включая газы CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.

Условно принимаем удельный объем газов (исходя из состава)

$$\gamma \approx 1 \text{ кг/нм}^3.$$

Тогда суммарный объем газопаровой смеси от процесса дегидратации составит  $200 \div 250 \text{ нм}^3/\text{ч}$  (расчетное значение  $205 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ).

Суммарный максимальный объем газов от процесса дегидратации, с учетом объема продуктов горения, составит

$$V_{\text{max}} = 250 + (76 * 1,1) \approx 330 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

Количество теплоты с газами, направляемыми в активатор

$$Q_{\text{га}} = 330 * 0,34 * 200 = 22440 \text{ ккал/ч}$$

Таблица 2.



Тепловой баланс аппарата дегидратации

№№ Статей	Наименование статей прихода	Кол- во, ккал/ч	Наименование статей расхода	Кол- во, ккал/ч	Примеч.
1.	Теплота материала из сушилки	58500	Теплота испарения остаточной влаги	15500	
2.	Теплота сгорания топлива (24 нм <sup>3</sup> /ч)	47150	Теплота нагрева газов дегидратации	8118	
			Теплота газов, направляемых в активатор	22440	330 нм <sup>3</sup> /ч
			Теплота материала на выходе	56700	
			Потери	2900	3%

Итого приход 105650      Итого расход 105658

Невязка баланса 8 ккал/ч

Примечание:

- с учетом времени процесса дегидратации 30мин скорость нагрева материала составит  $\approx 3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

- Учитывая скорость нагрева материала и соответственно время дегидратации размеры аппарата принимаем равными аппарату сушилки.

Скорость газов на “зеркале” материала составит:

$$W=(V_{\Gamma}+V_{\max})*(t_{\text{вых}}+273)/3600*S*273 = (750+330)*573/(3600*3,2*273)$$

$\approx 0,2$  м/с

**3. Расчет аппарата активации.**

Исходные данные:

–Расход материала (угля) на входе 200кг/ч

на выходе 170кг/ч

–Температура газов на активацию 900°С

–Температура газов после активации 650°С

Тепловой расчет процесса активации.

Принимаем максимальную температуру материала в процессе карбонизации 600 °С, а температуру газов после активатора (вход в карбонизатор) 650°С.

Теплота материала после карбонизатора (вход в активатор)

$$Q_{m1} = 200 * 600 * 0,4 = 48000 \text{ ккал/ч}$$

Теплота материала на выходе из зоны охлаждения

$$Q_{m2} = 170 * 120 * 0,245 = 4998 \text{ ккал/ч}$$

Эндотермический эффект реакции  $C + H_2O = CO + H_2$

Теплота образования из элементов  $H_2O$  - 57,8 ккал/моль

Теплота образования из элементов  $CO$  -26,4 ккал/моль

Тепловой эффект реакции

$$Q = -26,4 + 57,8 = 31,4 \text{ ккал/моль} = 2617 \text{ ккал/кг углерода}$$

Количество тепла на реакцию в активаторе

$$Q_a = 2617 * (200 - 170) = 78510 \text{ ккал/ч}$$

Принимаем, что процесс активации идет за счет реагирования углерода с парами воды (дополнительная активация идет за счет реакции  $C + CO_2$ ).

Тогда количество водорода, выделяющегося в активаторе

$$G_{h2} = 5 \text{ кг/ч} = 56 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Количество монооксида углерода

$$G_{co} = 70 \text{ кг/ч} = 72 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Количество прореагировавших паров воды

$$G_{h2o} = 45 \text{ кг/ч} = 56 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Количество теплоты с газами после сушки (на охлаждение АУ)

$$Q_{гс} = 7738 \text{ ккал/ч (201 нм}^3\text{/ч)}$$

Количество теплоты с газами после дегидратации

$$Q_{гд} = 20300 \text{ ккал/ч}$$

Таблица 3

Тепловой баланс процесса активации

№№ Статей	Наименование статей прихода	Кол- во, ккал/ч	Наименование статей расхода	Кол- во, ккал/ч	Примеч.
1.	Теплота газов из сушилки в зону охлаждения	7738	Теплота АУ на выходе	4998	
2.	Теплота газов дегидратации	20300	Теплота эндотермической реакции активации	78510	
3.	Теплота материала из карбонизатора	48000	Теплота газов на выходе	253175	Расход 1025 нм <sup>3</sup> /ч
3.	Теплота сгорания топлива (139 нм <sup>3</sup> /ч)	278000	Потери	17700	5%

Итого приход 354038                      Итого расход 354383

Невязка 345

Учитывая, что газы из аппарата активации поступают в аппарат карбонизации, избыток газа составит

$$V = 1025 - 850 = 175 \text{ нм}^3\text{/ч.}$$

Следовательно, необходимо этот объем газа вернуть за счет рецикла в активатор.

Для обезвреживания газов дегидратации их необходимо тоже направить в топку аппарата активации, что и было учтено в расчете.

Необходимый расход воздуха составит

$$V=309 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Расход газов карбонизации в топку составит

$$\text{При } Q = 2000 \text{ ккал/нм}^3 \quad V_{\text{г}} = 139 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Количество газов и паров углеводородов, выделившихся в карбонизаторе составит  $420-200=220 \text{ кг/ч}$  ( $\sim 220 \text{ нм}^3/\text{ч}$ )

Общее количество горючих газов на выходе из карбонизатора составит

$$V_{\text{гкар}} = 1100 \div 1300 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

#### 4. Тепловой баланс карбонизатора

##### Статьи прихода теплоты

Теплота материала из аппарата дегидратации 56700 ккал/ч

Теплота газов из активатора  $850 \cdot 0,37 \cdot 650 = 204425 \text{ ккал/ч}$

##### Статьи расхода теплоты

Теплота материала на выходе 48000 ккал/ч

Нагрев выделившихся газов ( $270 \rightarrow 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 26140 ккал/ч

Теплота газов на выходе 174000 ккал/ч

Потери 13000 ккал/ч

Таблица

4

#### Тепловой баланс карбонизатора

№№ Статей	Наименование статей прихода	Кол- во, ккал/ч	Наименование статей расхода	Кол- во, ккал/ч	Примеч.
1.	Теплота газов из активатора	204430	Теплота материала на	48000	

			выходе		
2.	Теплота материала из аппарата дегидратации	56700	Нагрев выделившихся газов и паров	26140	
Теплота газов на выходе			174000	1100÷1300 нм <sup>3</sup> /ч 380÷400 °С	
Потери			13000	5%	
	Итого приход		261130		Итого расход

261140

Невязка баланса 10 ккал/ч

Температура газов на выходе из карбонизатора 380÷400 °С.

## 5. Оценка уноса твердых частиц

Твердые частицы могут уноситься из сушилки и карбонизатора. Образование пыли в сушилке маловероятно, если поступающий на сушку торф продувался после участка приготовления исходного торфа. Образование пыли в карбонизаторе более вероятно, т.к. в нем происходит деструкция торфа с выделением газообразных веществ и возможным возникновением деформационных напряжений.

Оценка производится по взвешивающему значению критерия Рейнольдса, рассчитанному по интерполяционной формуле Тодеса и Розенбаума.

$$Re = 21,2 ((1+0,038Ar^{.66})^{0,5} - 1)^{1,5}$$

$$Ar = g(\rho_s - \rho)/Ds^3/\rho*v$$

$$Re = W*D_s/v$$

В предыдущих формулах

Ar – критерий Архимеда для твердой частицы

$\rho_s, \rho$  – плотности твердых частиц и газа соответственно

$v$  – кинематическая вязкость газа (принята по воздуху)

$D_s$  – диаметр твердой частицы

Решая предыдущую систему уравнений относительно  $D_s$ , получим максимальный размер частиц, которые могут уноситься из аппаратов сушки и карбонизации.

Сушилка – 170 мкм

Карбонизатор – 120 мкм

В расчете невозможно оценить количество пыли, образующейся в процессах. Это будет установлено эмпирически в процессе пуско-наладочных работ.

## 6. Количество газов на внутреннее технологическое потребление и сторонним потребителям

На внутреннее потребление

$$V_{\text{гвн}} = 141 + 24 + 139 = 304 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Количество теплоты сторонним тепловым потребителям при низшей теплоте сгорания 2000 ккал/нм<sup>3</sup>.

$$1000 * 2000 = 2 * 10^9 \text{ ккал/ч} = 2 \text{ Гкал/ч} \sim 2,3 \text{ МВт.}$$

При низшей теплоте сгорания 1500 ккал/нм<sup>3</sup>/ч

$$1,5 \text{ Гкал/ч} \sim 1,7 \text{ МВт}$$

## 7. Основные расчетные параметры

Основные расчетные параметры технологической линии

Наименование	Размерность	Сушилка	Дегидратация	Карбонизация	Активация	Тракт “дым-акт”	Тракт “акт-дегидр”	Тракт “дег-суш”	Конденсатор
Тв.мат-л t, вх/вых	°C	20/1	170/2	270/6	600/1	—	—	—	—
Расход	нм <sup>3</sup> /ч	80	70	00	20				
Газы карб-									

ЦИИ									
t	<sup>0</sup> C	130	130	130	130	130	130	130	380/130
Расход	нм <sup>3</sup> /ч	141	24	–	139	305	166	142	1100
Зеркало									
t <sub>ср</sub>	<sup>0</sup> C	200	200	380	650				
Расход	нм <sup>3</sup> /ч	9260	1080	1100÷ 1300	1300÷ 1500	–	–	–	–
Рецикл									
t <sub>ср</sub>	<sup>0</sup> C	110	200	–	650	–	–	–	–
Расход	нм <sup>3</sup> /ч	6740	750	–	175	–	–	–	–
В акт-р		200	330						
Газы в атм.									
t <sub>ср</sub>									
Расход	<sup>0</sup> C	110	–	–	–	–	–	–	–
	нм <sup>3</sup> /ч	2250	–	–	–	–	–	–	–
Воздух									
t, ВХ/ВЫХ	<sup>0</sup> C	–	–	–	–	–	–	–	20/200
Расход	нм <sup>3</sup> /ч	313	53	–	309	–	–	–	1913