

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
ТАДЖИКИСТАН**

**ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени академика М.С. Осими**

---

*На правах рукописи*

УДК 66:546+662.76 (573.3)



**БАХРИДДИНЗОДА ШОХИН БАХРИДДИН**

**ТЕРМОЛИЗ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ  
ФОН-ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5. Химическая технология (материалы и металлургия)  
(2.5.1. Технология неорганических веществ)

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

Гайбуллаева З.Х.

Душанбе – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень сокращений и условных обозначений.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	9
<b>ГЛАВА 1. УГОЛЬ, ЕГО СОСТАВ И СВОЙСТВА. МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ (Обзор литературы) .....</b>	<b>18</b>
1.1. Характеристики состава и свойств угля.....	18
1.2. Сырьевая и энергетическая потенциалы использования угля.....	20
1.3. Технологические факторы и экологические проблемы использования угля в качестве энергоносителя.....	25
1.4. Газификация угля - технологический способ повышение эффективности его использования.....	33
1.5. Типы применяемых газогенераторов для газификации угля.....	38
1.6. Влияние состава угля на параметры процесса его газификации.....	45
1.7. Опыт применения газификация угля на предприятиях Таджикистана.....	47
1.8. Заключение по литературному обзору и задачи настоящей работы.....	49
<b>ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФОН- ЯГНОБ.....</b>	<b>51</b>
2.1. Исследуемые материалы и их составы.....	51
2.2. Методы исследования, установки и измерительные приборы.....	52
2.3. Методика проведения теплофизических исследований .....	59
2.4. Технологические характеристики используемых углей.....	60
2.5. Технологические аспекты использования энергетического сырьевого потенциала угля.....	63
<b>ГЛАВА 3. ТЕРМОЛИЗ УГЛЯ ФОН ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА.....</b>	<b>66</b>
3.1. Термолиз угля Фон-Ягнобского месторождения для выделения летучих веществ его состава и получения пластифицированного углерода.....	66

3.2. Термолиз угля с использованием трубчатой печи.....	67
3.3. Термогравиметрический анализ пробы угля Фон-Ягнобского месторождения.....	77
3.4. Исследование кинетики окисления пластифицированного углерода кислородом.....	81
3.5. Материальный и тепловой балансы процесса газификации угля.....	86
3.6. Заключение по результатам третьей главы .....	91
<b>ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ ФОН ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....</b>	<b>93</b>
4.1. Многоцелевая технология переработки и газификации угля месторождения Фон Ягноб.....	94
4.1.1. Технологическая схема процессов переработки угля.....	94
4.1.2. Термолиз угля и получение углерода.....	98
4.1.3. Газификация углерода .....	104
4.1.4. Процесс конверсии CO, входящего в состав генераторного газа .....	101
4.2. Восстановление свинцово-цинкового концентрата водородом, полученного газификацией угля Фон-Ягнобского месторождения.....	103
4.2.1. Получение водорода из угля.....	103
4.2.2. Характеристика свинцово-цинковой руды Кони Мансур.....	106
4.3. Процессы восстановления сульфидов металлов при участии водорода.....	108
4.4. Конструкция двухступенчатого газогенератора и её описание.....	109
4.5. Заключение по результатам четвертой главы .....	113
<b>ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....</b>	<b>117</b>
5.1. Рациональное и экологическое безопасное использование топливно-энергетических ресурсов в отрасли.....	116
5.2. Разработка и обоснование комплексной технологии газификации угля Фон-Ягнобского месторождения.....	118
<b>Выводы.....</b>	<b>121</b>
<b>Рекомендации по практическому использованию результатов исследования.....</b>	<b>123</b>

<b>Список Литературы</b> .....	125
Список научных публикаций соискателя ученой степени по теме диссертации.....	139
<b>Приложения</b> .....	143

## Перечень сокращений и (или) условных обозначений

НАНТ	Национальная академия наук Таджикистана
ТТУ	Таджикский технический университет
ГУП «ТАЛКО»	Государственное Унитарное Предприятие «Таджикская алюминиевая компания»
ОАО	Открытое Акционерное Общество
НИИМ	Научно исследовательский институт металлургии
ГМЗ	Гидрометаллургический завод
РФА	Рентгенофазовый анализ
ДТА	Дифференциально -термический анализ
ТГА	Термогравиметрический анализ
ОФ	Органическая фаза
НФ	Неорганическая фаза
ОМУ	Органическая масса углей
СС	Слабо спекающийся
ТИ	Твердое ископаемое

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Одна из главных проблем современности и ближайшего будущего является обеспечение страны достаточным количеством энергии. Проблема эта довольно острая, имеющая не только технический, но и социально-экономический характер. Её надо решать в рамках нескольких противоречивых проблем, включающих индустриализацию экономики, сохранение чистоты атмосферы, обеспеченности потребности экономики в эффективном энергоносителе, желательного доступного и дешёвого. Решение проблемы энергообеспечения экономики страны требует комплексного подхода, но с ориентиром на использование местных сырьевых ресурсов.

Наша страна покупает природный газ и нефтепродукты из соседних стран Центрально - Азиатского региона и расходует на это большие финансовые ресурсы. Природный газ, помимо своего энергетического использования, также применяется в промышленном секторе для получения водорода в производстве аммиака на ОАО «Азот». Обычно в зимний период подача импортного природного газа уменьшается и данное предприятие простаивает и становится сезонным производством. Поэтому возникает необходимость решать данную проблему использованием взамен природного газа другого местного энергоносителя, т.е. угля. В промышленности широко известен способ газификации угля для получения газовых энергоносителей. Следовательно, преобразование энергии твердого топлива в энергию газовых энергоносителей путем его газификации может быть альтернативным способом замены использования дорогого природного газа на предприятиях страны.

Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года, определяет цели и задачи по развитию экономики страны, включая обеспечение энергетической независимости и ускоренную индустриализацию, что связана с развитием промышленности. Одним из приоритетных секторов экономики определено развитие угольной промышленности. Рост интереса к углю, как безальтернативному энергоносителю, особенно в условиях Таджикистана из-за

отсутствия добычи природного газа и нефти, вызван относительно низкой стоимости и высокой распространенности его месторождений в регионах страны.

Развитие индустриализации экономики страны требует строительства новых предприятий по переработке минерального и органического сырья. При этом растущая потребность в энергоносителях, увеличение стоимости их производств и усиление экологических проблем обуславливают актуальность разработки экологически чистых, комплексных и рациональных технологий получения энергоносителей из угля с созданием мало- и безотходных производств, что внесет существенный вклад в развитие промышленности. Значимой задачей является трансформация политики энергообеспечения промышленных производств, которую можно решить отказом от традиционного прямого сжигания угля в пользу современных экологически чистых технологий его использования. Решение поставленного научно-технического вопроса заключается в использовании процессов конверсии и газификации угля, позволяющих преобразовать твердое топливо в газообразные энергоносители ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) и другие химические продукты.

Поскольку, в настоящее время в Таджикистане объём использования угля Фон-Ягнобского месторождения значительно преобладает над количеством использования угля из других месторождений, поэтому данное исследование проведено с использованием угля указанного месторождения.

***Степень научной разработанности изучаемой проблемы.*** Научные представления о термическом разложении угля начали формироваться в конце XVIII – начале XIX века и получили развитие в работах отечественных и зарубежных исследователей [1–6]. Во второй половине XIX – начале XX века, с развитием газового освещения, металлургии и энергетики, изучались методы переработки угля при нагревании и его превращении в газ, а также сформировались представления о том, как уголь взаимодействует с веществами, применяемыми для этого процесса [7–17]. Существенный вклад в развитие концепции комплексной технологической переработки угля с получением газообразных, жидких и твёрдых продуктов внесли Д.И. Менделеев, В.И. Вернадский, И.М. Губкин и Н.Н. Семёнов

[7–10]. Во второй половине XX века получили развитие систематические экспериментальные исследования термоллиза и газификации углей различного ранга, направленные на обоснование оптимальных технологических режимов процессов. В этих работах изучено влияние температуры, скорости нагрева, состава газовой среды и природы газифицирующих агентов (водяной пар, диоксид углерода, воздух) на кинетику процессов и выход целевых продуктов [11–18]. Установлено, что эффективность технологических процессов термической переработки в значительной степени определяется петрографическим составом и структурными особенностями органической и минеральной частей угля [17–31].

Отдельное направление исследований связано с углями Таджикистана, отличающимися значительным разнообразием генетических и физико-химических характеристик, что определяет перспективы их использования в процессах термоллиза и газификации [19-21, 27, 31, 32]. Вместе с тем угли Фон-Ягнобского месторождения изучены преимущественно с геологоразведочной и топливно-энергетической точек зрения [33–42], тогда как вопросы их технологической переработки методами термоллиза и газификации остаются недостаточно исследованными. Это определяет актуальность настоящей диссертационной работы и необходимость проведения комплексных экспериментальных и теоретических исследований, направленных на научное обоснование рациональных технологий переработки углей месторождения Фон-Ягноб.

*Связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой* заключается в его соответствии ключевым государственным стратегическим документам Республики Таджикистан. Исследование согласуется с Концепцией развития угольной отрасли в Республики Таджикистан на период до 2040 года (утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 августа 2019, № 436), Стратегией развития «зеленой» экономики на 2023-2037 годы (утверждена постановлением Правительства РТ от 30 сентября 2022 г. № 482), предусматривающей внедрения экологически безопасных и энергоэффективных технологий в угольной промышленности, а также с положениями Национальной стратегии развития Республики Таджикистан до 2030 года, включающей

Программу ускоренной индустриализации на 2020-2025 годы (утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 сентября 2016 г. № 501).

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Целью исследования** является разработка комплексных технологий переработки угля месторождения Фон-Ягноб для получения энергетических и технологических газов и всех сопутствующих продуктов и материалов.

**Задачи исследования.** Поставленная цель достигается решением следующих задач исследования:

- определением вещественного и элементного состава исследуемых проб угля Фон-Ягнобского месторождения;
- проведением кинетического исследования процесса термолиза угля Фон-Ягнобского месторождения для определения температурной зависимости и скорости выделения летучих и смолистых компонентов от пластифицированного углерода и минеральных веществ;
- разработкой способа выделения и конденсации летучих и смолистых веществ состава угля Фон-Ягнобского месторождения;
- разработкой технологии газификации пластифицированного углерода и определения оптимальных параметров получения энергетических и технологических генераторных газов;
- проведением исследования процесса восстановления оксидных веществ пирометаллургического способа переработки свинцово-цинкового концентрата энергетическими генераторными газами;
- разработкой двухступенчатой конструкции реактора-газогенератора для получения пластифицированного углерода и его газификации;
- разработкой технологии газификации угля с применением двухступенчатого реактора-газогенератора.

**Объектами исследований** являются:

- уголь месторождения Фон-Ягноб (Таджикистан) и его составляющие компоненты;

- многокомпонентная газовая система, состоящая из водорода ( $H_2$ ), кислорода ( $O_2$ ), азота ( $N_2$ ), окиси углерода ( $CO$ ), двуокиси углерода ( $CO_2$ ), паров воды ( $H_2O$ ), воздуха и др.;

- минерально-вещественный состав углей;

- полиметаллические концентраты руд Кони Мансурского месторождения (Республика Таджикистан);

- комплекс химических соединений, используемых в аналитических и лабораторных исследованиях.

***Предметами исследований являются:***

- исследование физико-химических характеристик угля Фон Ягнобского месторождения Республики Таджикистан;

- определение теплотворности проб угля Фон-Ягнобского месторождения в зависимости от его состава;

- осуществление термолиза угля и исследование кинетики выделения компонентов его состава;

- анализ химического состава выделяемых веществ состава угля при его термолизе;

- осуществление совместного термолиза угля Фон-Ягнобского месторождения и газификации оставшегося после термолиза углерода для установления технологических параметров безотходной переработки угля в производствах материалов и тепла;

- анализ составов генераторного газа и определение его теплотворности;

- исследование по использованию генераторного газа угля Фон-Ягнобского месторождения в качестве восстановительного реагента продуктов пирометаллургической переработки полиметаллических концентратов руд месторождений Кони Мансур с составом, мас. %: Pb-45,56; Zn – 4,01; Fe – 20,55; Cu – 2,03; S– 21,78; Si – 3,78; Al – 1,29;

- разработка конструкции двухступенчатого газогенератора для совмещенного термолиза угля и газификации углерода;

- анализ и обобщение результатов исследования составов и свойств угля, параметров технологии газификации угля и определения оптимальной технологии газификации угля Фон-Ягнобского месторождения.

***Научная новизна исследования:***

1. Проведены термолиз и термогравиметрический анализ угля Фон-Ягнобского месторождения с выделением летучих и смолистых веществ и получением пластифицированного углерода. Выяснено, что: выделение летучих и смолистых веществ происходит при температурах 90-500°C, а пластифицированный углерод образуется при температурах 650-700°C. Конденсация каждого компонента состава газообразных летучих и смолистых веществ происходит при обратном температурном градиенте его выделения, что позволяет превращать его в жидкое состояние для дальнейшего использования согласно его составу; при проведении термического анализа в окислительной атмосфере начало выделения летучих веществ фиксируется при более низких температурах, чем в инертной среде аргона. Это свидетельствует о повышенной реакционной способности угольной массы в присутствии кислорода. Максимальная скорость убыли массы наблюдается в интервале температур 420-440 °C, что соответствует наиболее интенсивной стадии окислительно-деструктивных превращений органической части угля. Повышение скорости нагрева угля способствует увеличению интенсивности выхода летучих компонентов. В условиях инертной атмосферы (аргон) данный процесс протекает на протяжении всего температурного диапазона нагрева угля, тогда как в окислительной среде завершение выгорания угля происходит при температуре около 600 °C; окисление углерода кислородом протекает согласно механизму гетерогенных реакций с образованием промежуточного оксида  $C_2O_4$  с энергией активации образования и разложения соответственно  $E_1 = 180$  кДж/моль и  $E_2 = 197$  кДж/моль.

2. Разработана рациональная технология газификации угля, выражающаяся в выделении летучих и смолистых веществ и газификации пластифицированного углерода, которая позволяет: использовать полученный углерод в качестве восстановителей металлов или газифицировать в смеси с кислородом и водяным

паром для получения генераторного газа состава CO: H<sub>2</sub> =1:1; конвертировать оксид углерода состава генераторного газа с эквивалентным увеличением количество H<sub>2</sub> и абсорбционным выделением диоксида углерода получить чистый водород; пластифицированный углерод, смесь CO и H<sub>2</sub> и чистый H<sub>2</sub> могут быть использованы как активные химические вещества в металлургии и химической промышленности и как эффективные энергоносители в производствах тепла (энергии); при использовании 270 кг H<sub>2</sub>, полученного газификацией 1000 кг угля Фон-Ягнобского месторождения по разработанной технологии, в качестве восстановителя можно извлекать 27, 972 т свинца Pb из 32, 3 т минерала галенита PbS месторождения Кони Мансур.

3. Разработана конструкция двухступенчатого газогенератора угля, позволяющая в одном устройстве получать углерод (C) и летучие и смолистые вещества, газифицировать углерод (C) с получением генераторного газа и золу, использовать тепло горячего генераторного газа и золы угля для получения водяного пара, используемого для газификации углерода. Двухступенчатый газогенератор является компактным с наименьшими материальными и энергетическими потребностями и не имеет выбросов, загрязняющих окружающую среду.

#### ***Теоретическая и научно-практическая значимость исследования.***

Теоретические концепции и экспериментальные результаты термолиза и газификации угля взаимосвязаны между собой и характеризуются выделением летучих и смолистых веществ из состава угля при нагревании с образованием пластифицированного углерода. Конденсация каждого компонента состава газообразных летучих и смолистых веществ происходит при обратном температурном градиенте его выделения, что позволяет превращать его в жидкое состояние для дальнейшего использования согласно его составу в соответствующих химических производствах.

Результаты исследования используются при расчетах и составлении моделей термолиза и газификации углей различных модификаций. Практическая значимость результатов работы:

- внедрение результатов исследования в энергетических и промышленных предприятиях страны позволят переработать уголь по комплексным безотходным технологиям и получить чистый углерод, энергетический и технологический газ, золу угля, компонентов состава летучих и смолистых веществ, что является высокоэффективным производством без выбросов в окружающую среду;
- выделяемые летучие и смолистые компоненты угля служат сырьём для производства различных материалов;
- зола, образующаяся при сжигании угля, используется в качестве добавок при производстве цемента и других вяжущих материалов, а также может использоваться как оксидные соединения при целевом извлечении.
- энергетический генераторный газ представляет собой эффективный энергоноситель, применяемый в химической промышленности, энергетике, металлургии и ряде других отраслей народного хозяйства;
- состав материалов генераторного газа определяют его применение в качестве исходного сырья для синтеза аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и минеральных удобрений для агропромышленного комплекса.
- использование двухступенчатого реактора-газогенератора для газификации угля снижает материально-энергетические затраты и улучшает управление технологическим процессом переработки угля;
- результаты исследования имеют не только научно-техническую ценность, но и экологическую ценность ввиду использования безотходных технологий переработки угля.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

- комплексные и безотходные технологии газификации угля для получения энергетических и технологических газов и всех сопутствующих веществ процесса переработки угля и научно-технические результаты, способствующие повышению эффективности получения из угля высоко теплотворных энергоносителей;
- современные подходы к переработке угля для получения газов, применяемых в производстве химических соединений;

- комплексное технологическое решение для получения и газификации углеродсодержащих материалов в совмещённом реакторе-газогенераторе;

*Степень достоверности результатов* обоснована корректным выбором темы исследования, результатами проведённых экспериментов и достаточным объёмом исследовательских материалов. Она подтверждается их воспроизводимостью при реализации различных вариантов переработки угля по разработанным технологиям, использованием современных методов исследования и точных приборов для измерения параметров состава и свойств исследуемых веществ, а также применением надёжных методов обработки полученных результатов.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Область научной работы согласуется с направлением, соответствующее паспорту специальности 2.5. Химическая технология (материалы и металлургия) (2.5.1 – Технология неорганических веществ) по пунктам:

Пункт 1. Производственные процессы получения неорганических продуктов: соли, кислоты и щёлочи, минеральные удобрения, изотопы и высокочистые неорганические продукты, катализаторы, сорбенты, неорганические препараты. В диссертационной работе рассмотрены и разработаны технологические процессы получения неорганических продуктов при комплексной переработке угля Фон-Ягнобского месторождения, включая получение чистого углерода, генераторного газа и его компонентов, золы угля с установленным оксидным составом, летучих и смолистых веществ, а также определены составы концентратов, пригодных для использования в технологических схемах получения неорганических продуктов.

Пункт 2. Технологические процессы (химические, физические и механические) изменения состава, состояния, свойств, формы сырья, материала. В работе исследованы химические и физико-химические процессы термолиза и газификации угля, сопровождающиеся изменением состава, фазового состояния и свойств сырья, а также определены температурные интервалы протекания основных стадий этих процессов.

Пункт 3. Способы и процессы защиты окружающей среды от выбросов производств неорганических продуктов, утилизация и обезвреживание неорганических производственных отходов. В диссертации разработаны и обоснованы способы снижения экологической нагрузки при переработке угля за счёт реализации технологии с утилизацией летучих и смолистых веществ, использованием золы угля и процессов получения генераторного газа с минимизацией вредных выбросов. Рассмотрены методы обезвреживания неорганических производственных отходов.

Пункт 4. Способы и средства разработки, технологических расчётов, проектирования, управления технологическими процессами и качеством продукции применительно к производственным процессам получения неорганических продуктов. В работе разработана конструкция двухступенчатого реактора-газогенератора, выполнены технологические расчёты процессов термоллиза и газификации угля, а также сформулированы методы управления тепловыми и материальными потоками. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации технологических процессов получения неорганических продуктов и энергоносителей.

**Личный вклад соискателя** заключается в определении научного направления исследования, формулировании цели и задач работы, обосновании и выборе методических подходов, выполнении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных данных, установлении закономерностей и механизмов протекания химических процессов, подготовке научных публикаций, участии в научных и научно-практических конференциях, а также в самостоятельном оформлении и написании диссертационной работы.

**Апробация и реализация результатов диссертации.** Основные материалы диссертационной работы представлялись и обсуждались на: республиканской научно-практической конференции «Инновационное развитие науки» (г. Душанбе, Таджикистан, Центр исследований инновационных технологий НАНТ, 10 декабря 2020); республиканской научно-практической конференции «Тепловая энергетика и теплофизические свойства веществ» (г. Душанбе, Таджикистан, Таджикский

технический университет им. акад. М.С. Осими. 27-28 август, 2021); V международной научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Вопросы физической и координационной химии» (г. Душанбе, Таджикистан, Таджикский национальный университет, 15-16 ноября 2021); III международной научно-практической конференции «Роль женщин-учёных в развитии науки, инноваций и технологий» (24-26 август 2022, - г. Гулистан, Таджикистан), XIII Международной теплофизической школы «Теплофизика и информационные технологии» (г. Душанбе, Таджикистан, на базе ИВП, ГЭиЭ НАНТ и ТТУ им. акад. М.С. Осими. 17-20 октября 2022); XV Международной конференции «Металлургия цветных, редких и благородных металлов» имени члена- корреспондента РАН Г.Л. Пашкова (г. Красноярск, Россия, 6-8 сентября 2022); международной научно-практической «Теплоэнергетика и теплофизические свойства веществ», посвященная объявлению 2020-2040 годов двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (г. Душанбе, Таджикистан, ТТУ им. акад. М.С. Осими, 27-28 ноября 2023); юбилейной XX международной научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Перспективы свободной-2024» (г. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15-20 апреля 2024); XII международном конгрессе и выставке «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, Россия, 9-13 сентября 2024); на техническом совете Открытого Акционерного Общества «АЗОТ» (г. Сарабанд, Таджикистан, 18 сентября 2025).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 20 статей в отечественных и зарубежных изданиях. Из них 8 статей опубликованы в журналах рекомендованных перечнем рецензируемых научных изданий ВАК при Президенте Республики Таджикистан. 9 статей представлены и апробированы на международных и республиканских конференциях, семинарах, форумах. По итогам проведенных исследований получено три патента на изобретение, в том числе два малых патента Республики Таджикистан и один Евразийский патент.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики исследования, пяти глав, заключения, выводов, списка использованной литературы, включающего 136 наименований. Диссертационная работа изложена на 149 страницах, включает 21 таблиц, 40 рисунков и приложений в объеме 7 страниц.

# ГЛАВА 1. УГОЛЬ, ЕГО СОСТАВ И СВОЙСТВА. МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ

## 1.1. Характеристики состава и свойств угля

Уголь является горной породой растительно-минерального происхождения, имеет сложную многокомпонентную структуру, в связи с чем состав и свойства его компонентов определяют его многообразие, а также и выбор направления углепользования. Уголь характеризуется вещественным и элементным составами [5]. Общий вещественный состав исследуемого угля приведен в таблице 1.1.

**Таблица 1.1** - Распределение массы угля по составу и классификационным характеристикам [5]

Вид массы (индекс)	Состав	Основные компоненты состава
О - органическая масса	масса без минеральных и влагосодержащих компонентов	углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N), сера органическая (S <sub>орг</sub> )
Г – горючая масса	органическая масса + колчеданная сера	азот (N), сера органическая (S <sub>орг</sub> ), сера колчеданная (S <sub>кол</sub> )
С – сухая масса	горючая масса + зольные компоненты	углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N), сера органическая (S <sub>орг</sub> ), сера колчеданная (S <sub>кол</sub> ), зола (А).
А – аналитическая масса	сухая масса + аналитическая влага	все элементы сухой массы + аналитическая влага (W <sup>а</sup> )
Р - рабочая масса	аналитическая масса + внешняя влага	все элементы аналитической массы + внешняя влага (W <sup>вн</sup> )

В таблице 1.1 представлены результаты элементного состава угля с указанием основных характеристик со следующими обозначаемыми: W – влажность; А – зольность; содержание: С – углерода, Н - водорода, О – кислорода, N - азота, S - серы. Указанные элементы входят в состав органической и минеральной частей угля в связанном виде. Помимо влаги и золы, в составе угля присутствуют летучие соединения и смолистые вещества, которые, наряду с

углеродом, определяют поведение материала в термических процессах, таких как термолиз и газификация.

В таблице 1.2 обобщены вещественные составы углей месторождений Таджикистана, которые имеют промышленное применение в качестве энергоносителя на ТЭС и предприятиях страны. Более подробная информация об запасах угля на данных месторождениях, а также свойствах угля, приведены в первоисточниках [6-13].

**Таблица 1.2** – Пределы изменения состава углей разрабатываемых месторождений Таджикистана [5, 6, 10]

Влажность ,w, %	Зольность, А, %	Летучие вещества и смолы,%	Соединения серы, %	Фосфор, %	Элементный состав, %	
					С	Н
Месторождение Фон-Ягноб						
0,25-2,62	3,18-38,81	20,73- 40,52	0,17-6,84	0,05– 0,237	79,06- 87,53	4,73- 6,33
Месторождение Шураб						
7,5-11,6	5,99-10,83	2,06-27,81	1,10-1,77	-	78,4- 78,9	3,4-3,7
Месторождение Зидди						
2,45-5,24	1,45-39,48	24,39- 39,48	0,33-2,27	-	75,44- 81,82	4,38- 5,03
Месторождение антрацита Назар Айлок						
0,4-7,4	1,2-8,74	5,3-15,4	0,11-0,83	0,003- 0,086	86,62- 88,9	3,09- 3,26

Согласно вышеуказанным литературным источникам, теплотворность углей варьируется в пределах (ккал/кг): Фон-Ягноб — 6250–8463; Шураб — 4147–6820; Зидди — 6708–7980; антрацит Назар-Айлока — 7475–9100. В целом, теплотворность используемых углей составляет от 4147 до 9100 ккал/кг (от 17,34 до 38,04 МДж/кг), в среднем 27,7 МДж/кг. Поскольку уголь месторождения

Фон-Ягноб выбран в качестве объекта исследования, то приводим более подробные данные о его составах.

Согласно данным [6, 7] состав угля данного месторождения является многокомпонентным, при его тепловой переработке для коксования, кроме кокса выделяются водяной пар, смолы, жидкий бензол,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , коксовый газ в количествах, мас. %: кокс от 70,89 до 76,03; смолы - от 4,2 до 6,9; жидкий бензол от 0,97 до 1,04; водяной пар - от 3,80 до 5,90; аммиак ( $\text{NH}_3$ ) – от 0,16 до 0,21; сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – от 0,023-0,035; коксовый газ – от 13,16 до 16,90. При переработке 1 т угля количество выделяемого коксового газа колеблется в пределах 275 - 350 м<sup>3</sup>. Жидкий бензол и коксовый газ представляют собой многокомпонентные смеси. В составе бензольной фракции выделяются фенольные соединения, представленные фракциями с температурами кипения до 300°C. Интервал их выделения составляет 300–360 °С. В общем их содержания варьируется от 3,21 до 18,15 %. Помимо этого, в бензольной фракции присутствуют пиридиновые соединения, также разделяющиеся на фракции с температурами кипения до 300°C и 300–360 °С, их содержание в целом составляет от 0,71 до 9,90 %. Оставшаяся смесь бензола, состоит из высокомолекулярных компонентов с высокой температурой кипения и вязкостью. Это сложный углеводородный состав продуктов термического разложения угля. Газ, образующийся при переработке угля, по объему включает такие компоненты: метан ( $\text{CH}_4$ ) – 15,40 – 23,90 %; гомологи метана ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) – 1,9 – 3,06 %; окись углерода (CO) - 8,30 – 10,1 % и водород ( $\text{H}_2$ ) - 59,0 – 70,4 %. Такой состав характеризуется высококалорийным газом, который обладает значительным энергетическим потенциалом.

Также определено, что сера (S) и фосфор (P) связаны с углеродом (C), поэтому они также будут участвовать в процессах горения угля. Их сжигание может привести к образованию  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и других веществ.

## **1.2. Сырьевая и энергетическая потенциалы использования угля**

В работах [14-17] указаны перспективные направления углепользования и отмечается, что уголь в отличие от других природных горючих ископаемых

(природный газ и нефть) является не только энергоносителем, но и характеризуется богатым минеральным составом и включает более 80 минеральных химических элементов в своём составе, поэтому имеет широкий спрос также для использования в качестве сырья в производстве материалов. Сырьевая база угля многократно превышает запасов нефти и природного газа в недрах Земли и месторождения угля практически имеются на территориях большинства стран мира, когда месторождения нефти и природного газа имеются у немногих стран. Так, например, запасы угля в месторождениях Таджикистана оцениваются в более 4.5 млрд. т и в стране разведены более 31 месторождения угля [18].

Сырьевой и энергетический потенциалы угля можно оценить сравнением элементного состава разных видов ископаемого топлива, приведённых в таблице 1.3 [19-23].

**Таблица 1.3** - Элементный состав энергоносителей [24]

Материал	Элементный состав *, %					Содержание воды, %	Содержание летучих *, %
	С	Н	О	N	S		
Древесина	48-52	5,8-6,2	43-45	0,05	-	40-60	65-75
Торф	49-60	5-8	28-48	1-4	0,1-1	80-92	70-80
Бурый уголь	65-75	5-8	12-30	0,5-1,5	0,5-3	8-10	43-60
Плазменный уголь	75-81	5,8-6,6	>9,8	1-1,5	0,5-1,5	4-8	4-45
Газопламенный уголь	81-85	5,6-5,8	7,3-9,8	1-1,8	0,6-1,8	2,5-4	35-40
Газовый уголь	85-87,5	5,0-5,6	4,5-7,3	1-1,8	0,6-1,8	1,2-2,5	25-28
Жирный уголь	87,5-89,5	4,5-5	3,2-4,5	1-1,8	0,6-1,8	0,8-1,2	19-28
Кузнечный уголь	89,5-90,5	4,0-4,5	2,8-3,2	1-1,7	0,6-1,7	<1	19-24
Антрацит							
Б	>91,5	<3,75	<2,5	1-1,7	0,6-1,7	<1	10-12
А	>91,5	<3,75	<3,5	1-1,7	0,6-1,7	<1	<10

Элементный состав исследуемых углей и количество летучих веществ его состава, которые являются индикаторами степени углеродного формирования, были определены на основе массы образца угля. Массу образца определяли при нагревании угля в среде, не содержащий кислород.

Сравнение данных таблицы 1.3 показывают на преимущество угля (для всех его разновидностей) над торфом и древесиной, содержание теплотворных элементов в составе угля больше, чем в составах древесины и торфа. Различные виды угля содержат до 6.6 % водорода и до 91.5 % углерода, что свидетельствует о том, что практически вся органическая масса угля является теплотворной.

Преимущество угля, а также его огромные природные запасы, позволили ему быть широко используемым топливом для развития промышленности и энергетики во многих странах мира. С конца двадцатого года прошлого века до настоящего времени произошёл бурный темп развития использования угля во многих государствах мира.

Свидетельством сказанного является диаграмма мирового развития углепользования в 2024 гг. в разных континентах мира, приведённая на рисунке 1.1, которая свидетельствует о том, что в настоящее время общий объём ежегодно потребляемого угля достигает более 8 млрд. т., в том числе, тыс. тонн [25]:

- антрацита - 485898,8;
- коксуемого угля - 1038379,5;
- каменного угля - 4620365,8;
- бурого угля - 2593705,6;
- все виды угля – 8738349,7;
- изменение за 10 последних лет - 7,7%;
- всего на душу населения- 1.1. тонн.

Использование угля в наиболее развитых странах мира характеризуется данными рисунка 1.2. Наиболее крупными потребителями угля являются Китай (4818 млн. т), Индия (1155 млн.т.), США (467 млн. т.), что отражает объёмы современной экономики этих стран.

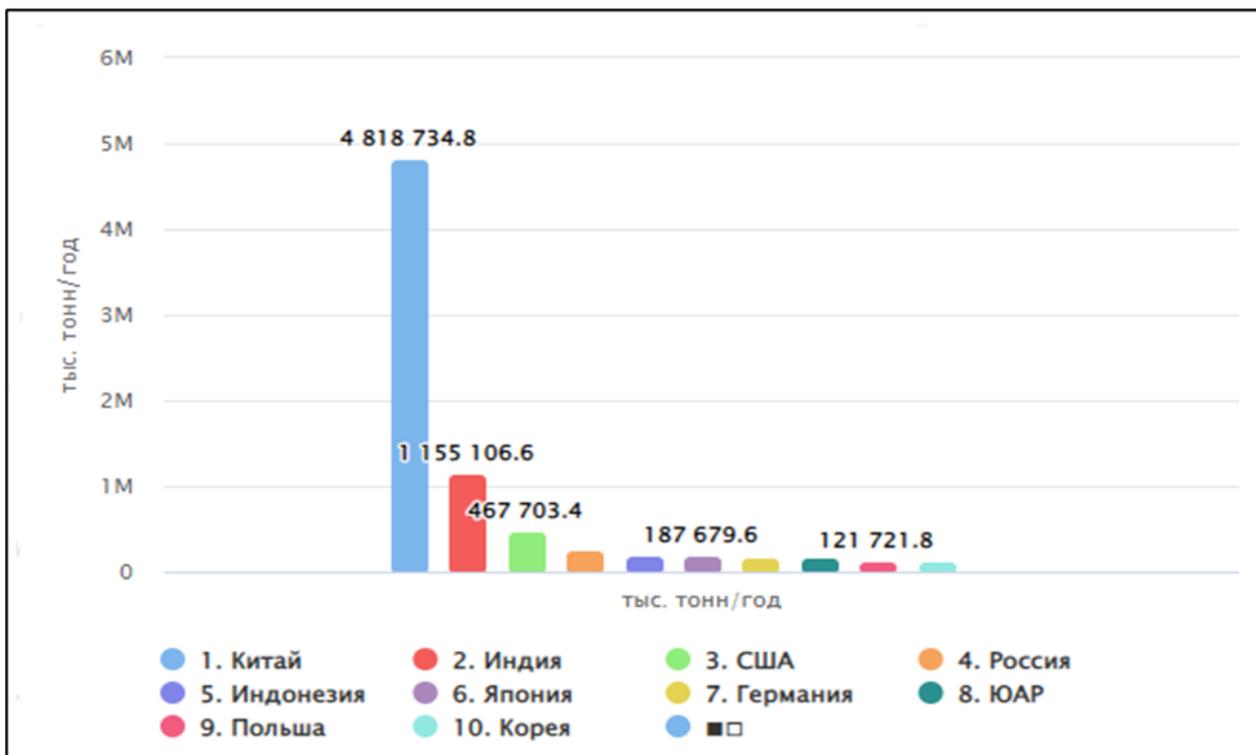


Рисунок 1.1. - Мировое потребление угля в тыс. тонн/год [25]

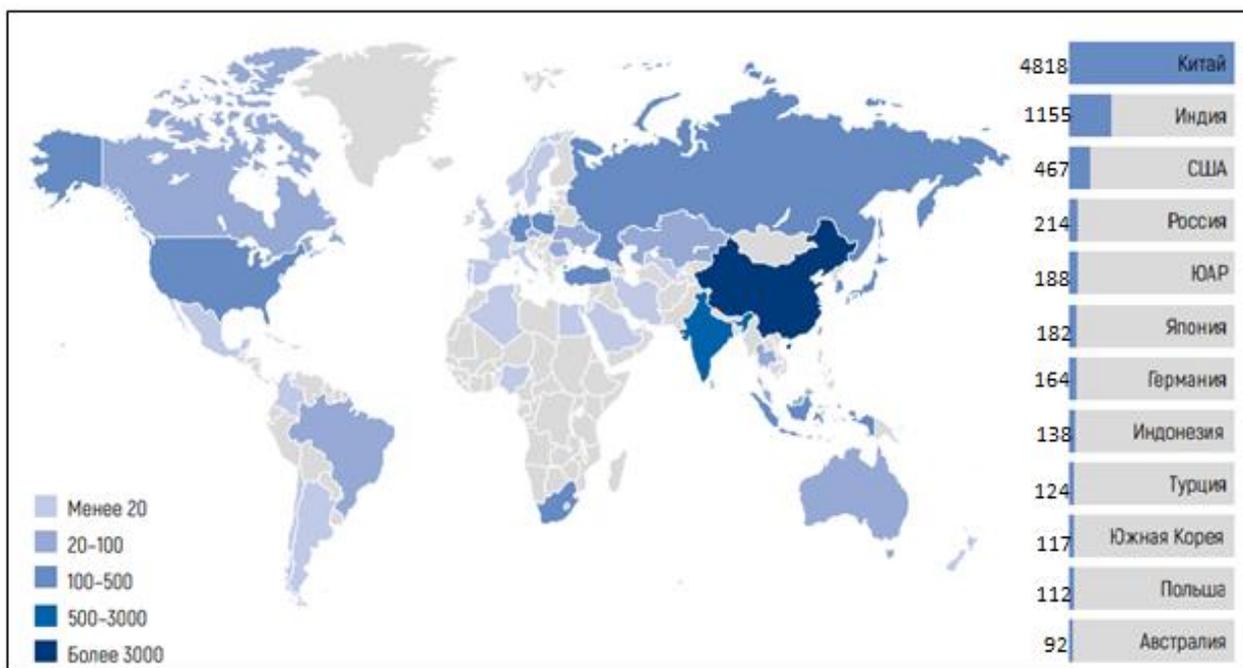
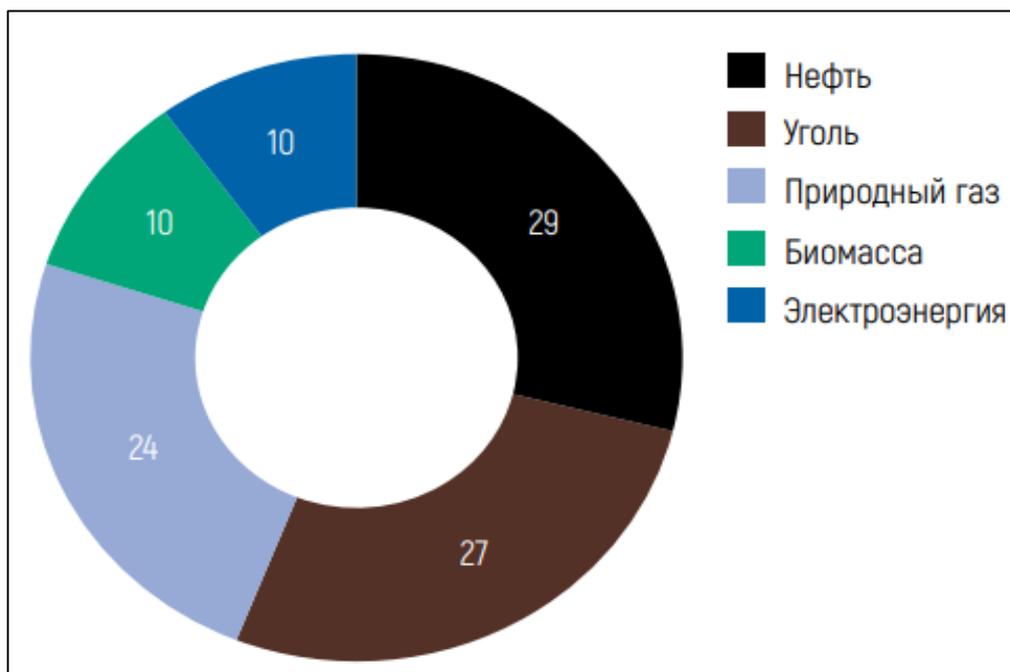


Рисунок 1.2. – Объем потребления угля в развитых странах в 2024 году, млн. тонн [25]

На рисунке 1.3 приведена диаграмма распределения доли разных природных энергоносителей в общем объеме использования ископаемого топлива

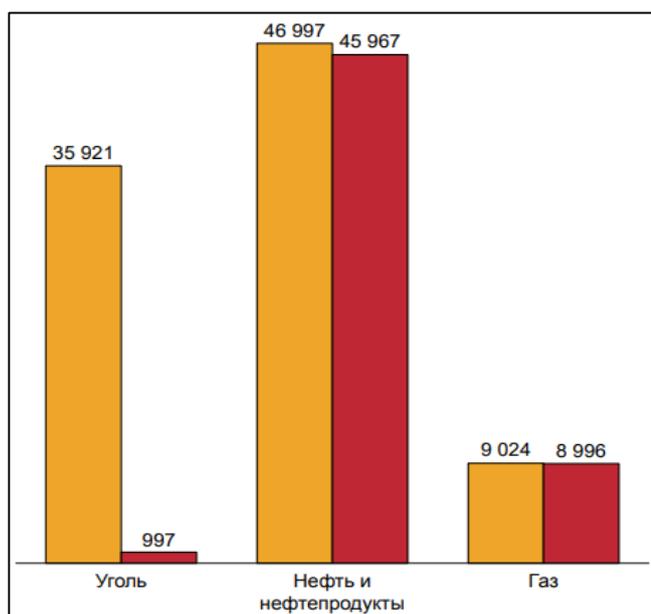


**Рисунок 1.3.** – Распределение объёма потребления природных энергоносителей по типам ископаемого топлива в 2024 году, % [26]

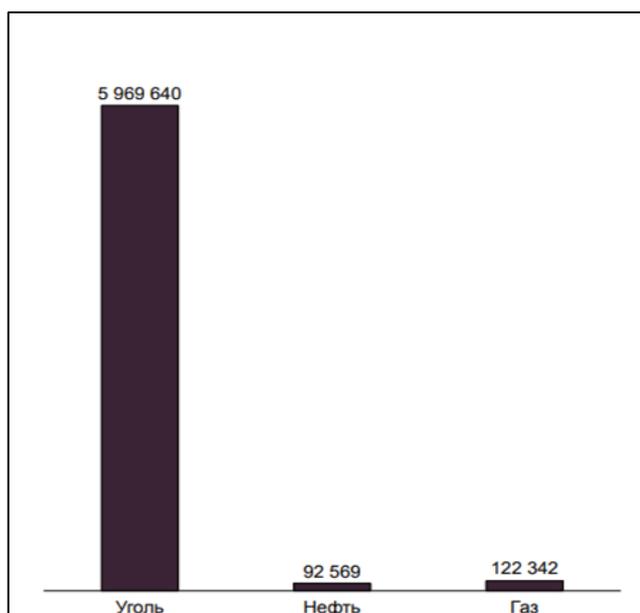
Доля угля в общем объеме потребления первичной энергии в мире превышает 27%. Среди основных энергоносителей уголь занимает третье место после нефти (29 %) и опережает природный газ (24%). За последние 50 лет добыча угля стабильно увеличивалась во всем мировом производстве. В структуре добываемого угля примерно 14% приходится на коксующие угли, 75% - на каменный и 11% - на бурый уголь. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), глобальный спрос на уголь будет сохраняться, при этом основная часть добываемого угля будет направлена на производство электроэнергии и обеспечения работы промышленных химических предприятий [24-28].

В русле расширения объёма использования угля в мире в Таджикистане также уголь становится востребованным энергоносителем для использования в индустриализации экономики страны. В настоящее время уголь занимает более 27% в структуре общего потребления первичной энергии в стране. Уголь единственное ископаемое топливо, потребление которого в Таджикистане покрывается за счет внутреннего производства, а его разведенные запасы в республике в 27 раз превосходят запасы нефти и газа, вместе взятые [29].

В Таджикистане практически отсутствует добыча природного газа и нефти, поэтому основными энергоносителями местного производства являются только уголь и электроэнергия. Для обеспечения потребности производства в нефтепродукты и природный газ их импортируют из других стран, в основном из России, Казахстана и Республики Узбекистан. На рисунке 1.4 и рисунке 1.5 приведены количественные данные импорта и потребления энергоносителей, а также разведённые запасы полезных ископаемых Таджикистана по данным [30].



**Рисунок 1.4.** - Потребление и импорт энергоносителей в Таджикистане в тыс. тонн на 2024 г



**Рисунок 1.5.** – Разведённые запасы энергоносителей в Таджикистане в тыс. тонн на 2024 г

### **1.3. Технологические факторы и экологические проблемы использования угля в качестве энергоносителя**

В работах [31, 32] нами подробно анализированы технологические факторы и экологические проблемы использования угля в качестве энергоносителя.

Уголь является природным углеродсодержащим материалом с широким диапазоном генетических типов, с структурными характеристиками и химико-технологическими свойствами. Эти качества делают уголь ценным ресурсом как в энергетике, так и в химической промышленности. Благодаря высокой содержимой органической массы и наличию функциональных групп, уголь используется как топливо, и как технологическое сырьё для получения разнообразных химических продуктов. Согласно данным [33, 34], порядка 27% угля, поставляемого потребителям, направляется на технологические нужды в отрасли металлургической, коксохимической, газохимической, органической промышленности. Производство металлургического кокса является преимущественным, где кокс используется восстановителем в доменном процессе и одновременно источником ценных летучих продуктов. В процессе коксования угля выделяются смолы, аммиак, бензол, фенолы и другие компоненты.

Оставшаяся часть угля используется на энергетические нужды [35, 36], в том числе на тепловых электростанциях, которые потребляют более 50% общего объёма энергетического угля. Кроме того, значительные объёмы угля используют в коммунальном секторе и на промышленных предприятиях для получения тепловой энергии, пара и электроэнергии [37, 38]. Таким образом, уголь продолжает играть важную роль не только как энергоноситель, но и как стратегическое сырьё.

В настоящий период с использованием экстракционных технологий извлекают из органической массы угля ароматические и алифатические фрагменты. Низкотемпературные методы химической переработки угля основаны на особенностях строения угля, имеющее сложный состав. При экстракции угля органическими растворителями, такими как бензин или бензол, из состава угля

выделяют битумы, которые являются многокомпонентными смесями, включающие парафины, воски, масла, смолы и другие вещества.

Применение водного раствора гидроксида натрия в качестве экстрагента с последующим осаждением органических компонентов серной кислотой позволяют получить из угля гуминовые кислоты, которые находят широкое применение в аккумуляторной промышленности и при бурении нефтегазовых скважин.

В интервале температур 350-500 °С органическая часть угля способна к термическому разложению и процессам каталитической или не каталитической гидрогенизации, что широко применяется в технологиях получения жидких углеводородных топлив. Эти методы активно развиваются как перспективные направления глубокой переработки твердых углеводородных материалов [39].

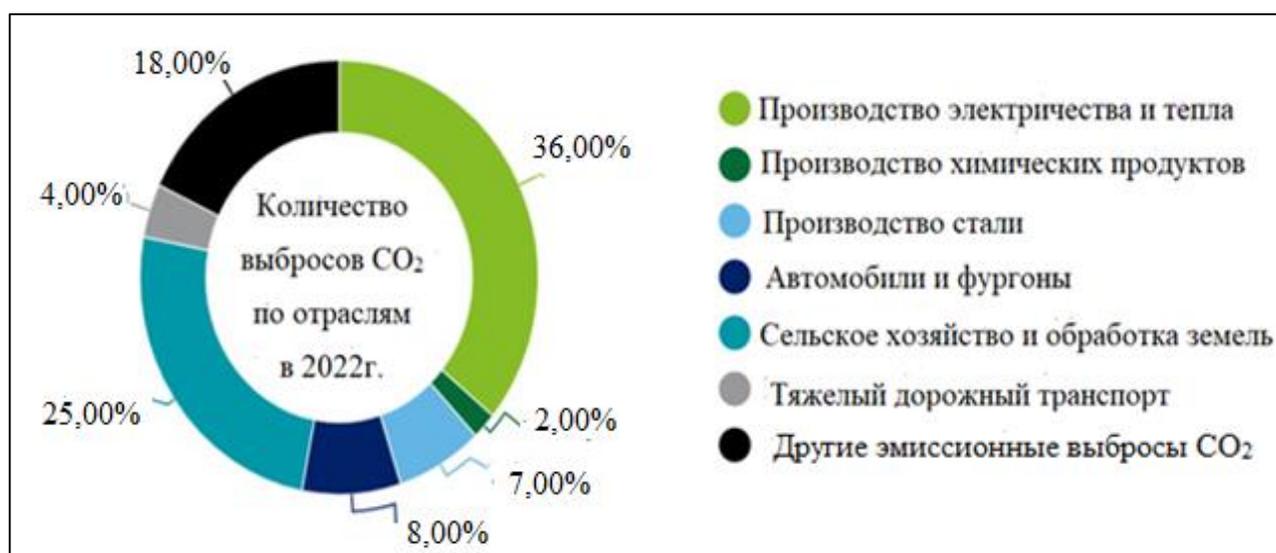
Термическое нагревание угля в условиях отсутствия доступа кислорода до температур 500-700 °С приводит к полукоксованию угля и термическому разложению его органической части. В результате происходят реакции деструкции угля, сопровождающиеся отщеплением и испарением летучих компонентов, включая присоединённые функциональные группы, алифатические соединения и низкомолекулярные ароматических фрагменты. Основными продуктами полукоксования угля являются жидкие фракции - смесь смол и масел, которые находят широкое применение в виде сырья для получения разнообразных органических веществ. Полукоксование, проводимое в среде водяного пара, способствует интенсивному развитию пористой структуры твердого остатка. Удельная поверхность таких образцов может достигать до 300-800 м<sup>2</sup> /г, что придает им выраженные адсорбционные свойства. Получаемый таким образом материал классифицируют как активированный уголь и широко применяют в процессах сорбции, очистки и катализа. Как ключевой момент можно отнести переработку угля в процессе коксования. Это термическая обработка угля при температурах до 1000 °С и выше в бескислородной среде.

Цель этого процесса является получение металлургического кокса, спеченного твердого остатка с высокой степенью обуглероживания и низким содержанием серы. Этот продукт широко используется в металлургической

промышленности как восстановитель и конструкционный материал в доменных агрегатах.

Исторически наиболее распространённым способом использования угля остается его прямое сжигание в качестве топлива. Наибольший объем угля, добываемого в мире, потребляется в энергетическом секторе. Электростанции являются основными потребителями, на долю которых приходится порядка 68,9 % мирового объема добычи, что эквивалентно примерно 5,2 млрд. тонн угля в год.

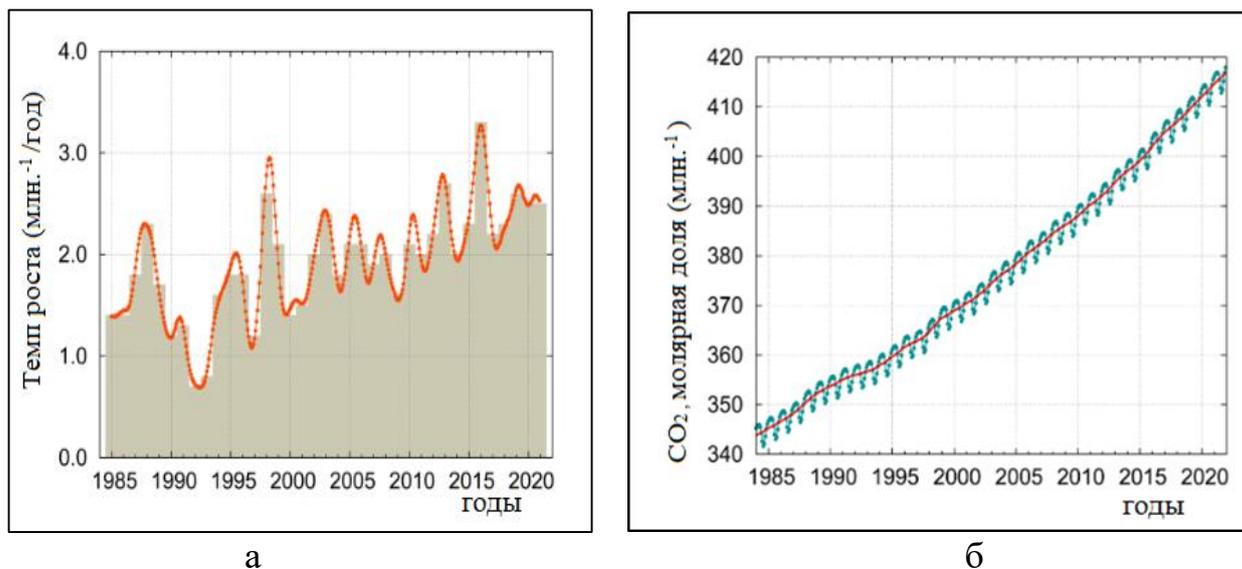
Однако, образовавшийся при сжигании угля двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) является парниковым газом, который приводит к накоплению парниковых газов в окружающей среде и этот фактор негативно влияет на развитие угольной энергетики. Как видно из диаграммы на рисунке 1.6, основным источником выбросов двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) является использование угля для получения тепла и выработки электрической энергии.



**Рисунок 1.6.** – Структура выбросов углекислого газа по различным секторам

Динамика роста количество выбросов  $\text{CO}_2$  характеризуется следующими данными. Если в 1880 году количество выброса  $\text{CO}_2$  в атмосферу в результате сжигания угля составило всего  $0,1 \cdot 10^9$  т, то в 1980 г это количество увеличилось до  $5 \cdot 10^9$  т, т.е. за 100 лет выбросы газов от сжигания ископаемого горючего увеличились в 50 раз [32].

Анализ выбросов двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) от сжигания углей на электрических станциях с 1985 по 2020 годы, приведенные на рисунке 1.7, показывают на его возрастающую характеристику. Выбросы парниковых газов происходят не только от сжигания угля, но и в промышленных производствах строительных материалов, как цемент, известь, гипс и др. Сейчас в Таджикистане сравнительно быстрыми темпами развивается промышленное производство цемента с применением местного энергоносителя в виде угля.



**Рисунок 1.7.** – Темп роста образования (а) и количество выброса двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  (б), образующегося от сжигания углей на электростанциях

Вместе с выбросами углекислого газа в атмосферу поступают сопутствующие вещества, содержащие соединения серы, фосфора и других элементов, входящих в состав угля. Согласно данным [40, 41], при производстве одной тонны цемента в атмосферу может выбрасываться до 0,7 тонны  $\text{CO}_2$ . При этом около 60 % углекислого газа образуется в результате разложения сырья, а оставшиеся 40 % при сжигании топлива. Расчеты показали, что производство цемента обеспечивает от 5 % до 7 % мировых выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). В окружающую среду также поступают выхлопные газы от таких промышленных предприятий, как металлургической, химической и других отраслей.

Выбросы газообразных продуктов в атмосферу наглядно демонстрируются на рисунке 1.8, где представлены снимки Душанбинского цементного завода и

Таджикского алюминиевого завода в процессе их функционирования. На изображениях четко прослеживается интенсивное выделение промышленных дымовых газов, содержащих оксиды углерода ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_2$ ), сернистые соединения ( $\text{SO}_2$ ), а также значительное количество взвешенных твердых частиц и технологической пыли. Эти компоненты формируют антропогенную нагрузку на атмосферный воздух и оказывают негативное влияние на окружающую среду и здоровье населения близлежащих районов. На рисунке 1.9 показан снимок участка месторождения Фон-Ягноб, из которого следует, что при добыче и хранения угля также образуются выбросы в окружающую среду.



**Рисунок 1.8.** - Функционирование Душанбинского цементного завода (а) и Таджикского алюминиевого завода (б)



(а)



(б)

**Рисунок 1.9.** - Добыча (а) и хранение (б) угля в месторождении Фон-Ягноб (Таджикистан)

Согласно проведенным исследованиям в работах [32, 42], обобщённые количества выбросов от использования органических видов энергоносителя в 2022 году оцениваются данными таблице 1.4. Выбросы таких газов как: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и CO в атмосферу с дымовыми газами и от природных процессов оцениваются данными, приведенными в таблице 1.5.

**Таблица 1.4.** - Виды и количества выбросов от использования органических энергоносителей [32, 42]

Выбросы в атмосферу и источники их образования	Количество, млн. т/год				
	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>3</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	NO <sub>2</sub>
Использование угля	7000	15	100	мало	30
Использование нефтепродуктов	700	250	40	60	36
Использование природного газа	2400	-	-	-	5
Использование нестандартного горючего (дрова, сельскохозяйственные отходы и др.)	2000	50	мало	мало	мало
Выбросы цветной металлургии	-	-	25	-	-
Испарение растворителей	-	-	25	-	-
Сжигание отходов	600	35	мало	15	мало

**Таблица 1.5.** - Объем выбросов SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и CO в атмосферный воздух [32, 43]

Выбросы в атмосферу	Вещества и их количества, млн. т		
	CO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
с дымовыми газами	304	53-70	70
от природных процессов	300	770	150

Указанные выбросы вызывают три основные экологически неблагоприятные ситуации в атмосфере:

- увеличение концентрации вредных примесей в воздухе;

- формирование парникового эффекта;
- повышение температуры на поверхности Земли, что ведет к таянию ледников и другим негативным последствиям.

Попадая в атмосферу, молекулы  $\text{CO}_2$  поглощают инфракрасное излучение, исходящее от Земли, что приводит к нагреванию приземных слоёв атмосферы. препятствуют его отражению обратно в космос. За 150 последних лет процесс увеличения количества соединений  $\text{CO}_2$  в атмосфере показывает 13 отн. %. Однако, надо отметить, что и в настоящий период ежегодный прирост выбросов  $\text{CO}_2$  продолжает расти и составляет 0,2 отн. % . Если текущая тенденция сохранится, к 2025 году средняя концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере возрастёт на 20%, а к 2050 году может удвоиться [44].

В нынешнем состоянии экономики страны, когда потребление нефтепродуктов, природного и сжиженного газа в Таджикистане обеспечивается их импортом из других стран, уголь является единственным конкурентоспособным и перспективным энергоносителем промышленности и энергетике, а также для обеспечения теплом в домах жителей. В то же время, следует учесть, что угольную промышленность относят к грязным топливным ресурсам, так как продукты его переработки имеют негативное воздействие на основные элементы окружающей среды: водные объекты, атмосферный воздух, земельные ресурсы, растительный и животный мир [45], поэтому для использования угля необходимы использования инновационных, рациональных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологии, которые могут соответствовать сегодняшней политики декарбонизации производства материалов и способствовать комплексной переработке угля. Эти технологии должны иметь четко выраженную ориентацию на разработку и внедрение новых и прогрессивных способов использования компонентов состава угля. Необходимо отметить, что во многих странах мира принимаемые меры по созданию и использованию экологически чистых технологий угольной генерации [46-53] свидетельствуют о том, что борьба за «чистый уголь» сегодня сопровождается конкретными проектами и программами. Экология применения угля требует создания новых технологий углепользования,

которые обеспечивают комплексность использования его состава и тем самым сохраняют чистоту окружающей среды.

Подобные технологии получили общее название как чистые угольные технологии [54]. В течении последних лет в Австралии, Великобритании, США, Германии, Испании, Индонезии, Колумбии, КНР, Пакистан и Японии активно проводятся научно-исследовательские работы и промышленные испытания, направленные на совершенствование технологий переработки угля, а также на повышение технико-экономических показателей отдельных этапов этих процессов.

#### **1.4. Газификация угля -технологический способ повышения эффективности его использования**

Газификация угля представляет собой метод переработки для получения газов и других веществ состава угля для дальнейшего их использования по разным назначениям. Другими словами, газификация угля является термохимическим процессом преобразования органической его части в генераторный газ, удобный для последующего сжигания, как в горелках котлов различного назначения, так и в камерах сгорания двигателей различных типов.

Газификация угля осуществляется в специальных реакторах-газогенераторах проведением реакции окисления углерода и других элементов состава угля кислородом, водяным паром, воздухом и их смесью при температурах до 1000-1200 °С. Образующиеся газы, называются генераторными газами и их применяют в качестве газового энергоносителя (энергетический генераторный газ) или для производства разных химических веществ (технологический генераторный газ). Основные положения способов газификации углей подробно изложены в справочниках и других первоисточниках [5, 45, 55-70].

Существуют различные критерии классификации газификации угля. Одним из таких подходов основан на агрегатном состоянии топлива в газогенераторной установке.

В соответствии с этим выделяют газификацию в неподвижном или медленно опускающемся слое твердого топлива, газификацию в псевдоожигенном слое, а

также в потоке пылевидного угля. Другой принцип классификации относится к способам подачи тепла в реакционную зону газификации. В этом случае различают автотермические и аллотермические процессы газификации. В автотермическом способе газификации угля температурный режим процесса обеспечивается теплом реакций, протекающих между компонентами состава угля и веществами-окислителями, в аллотермическом способе газификации угля теплообеспечение газогенератора в основном осуществляется подводом тепла извне, поскольку в газогенераторе скорость протекания эндотермических реакций будет преобладать над скоростью протекания экзотермических реакций.

В ряде стран известно применение технологий превращения различных видов угля в газообразное топливо. Наибольшее развитие они получили в Германии. Как известно, промышленное объединение «IG Farbenindustrie» в период Великой Отечественной войны (1941-1945 гг) достигло значительных масштабов производства - 4 млн. тонн синтетического топлива, смазочных материалов и других углеродсодержащих продуктов, получаемых из угля. Этот исторический пример демонстрирует потенциал технологий химической переработки угля, позволяющих компенсировать дефицит природных нефтяных ресурсов. В современных условиях к данным технологиям проявляется возрастающий научно-технический интерес. Особую значимость приобретают исследования, направленные на получение водорода и углеводородного сырья для обеспечения потребностей химической, металлургической, горно-перерабатывающей и смежных отраслей промышленности.

В этой отрасли разработано множество современных технологий, основанных на процессах пиролиза, газификации, ожижения с целью получения энергоносителей и ценных химических соединений [71-84].

Теплотворная способность первичных энергоресурсов, в том числе углей, приведена в таблице 1.6. Из приведённых данных следует, что из твердых видов топлива эффективным является использование каменного угля, поскольку другие твердые энергоносители имеют очень низкий потенциал теплотворности.

Главным преимуществом газификации твердого топлива является низкий уровень негативного воздействия на окружающую среду. Это преимущественно обусловлено, тем, что в процессе газификации обеспечивается достаточное время пребывания газообразных продуктов в зоне окисления при высоких температурах порядка 1000-1200 °С. В таких условиях происходит практически полное дожигание летучих веществ и вредных примесей, что способствует снижению выбросов оксидов углерода, серы и азота. После прохождения зоны окисления продукты реакции попадают в восстановительную зону, где формируется генераторный газ.

Анализ мирового уровня развития технологий газификации угля и их востребованности показывает, что генераторный газ входил в число основных источников энергии, используемых в промышленности и в быту [82].

**Таблица 1.6.** – Теплотехнические характеристики первичных энергетических ресурсов

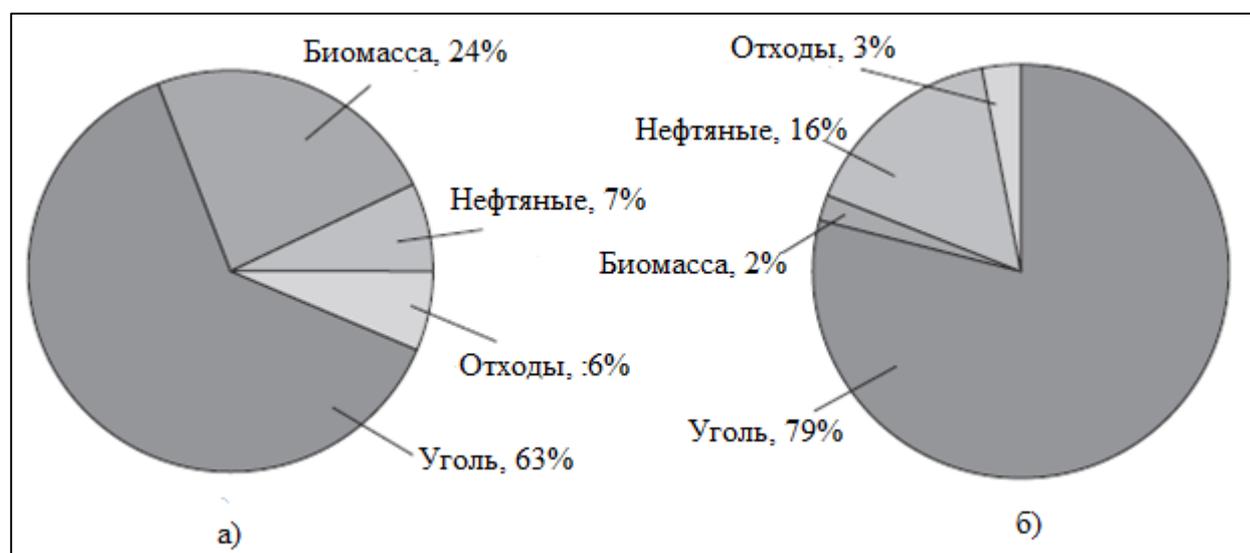
Источники энергии	Теплотворная способность, кКал/кг	Тепловой коэффициент
Нефть	10,5	1,5
Природный газ	10,4	1,5
Каменный уголь	7,0	1,0
Бурый уголь	3,0	0,4
Торф	3,4	0,5
Дрова	2,5	0,4
Горючие сланцы	2,1	0,33

*Дополнение: Энергетическая ценность каменного угля принята за единицу и для остальных энергоносителей значение теплового коэффициента рассчитан по отношению к тепловому коэффициенту каменного угля.*

Сохранение чистоты окружающей среды требует использования эффективных технологий переработки угля. В связи с этим ведутся множество видов исследований по термохимической конверсии угля, включая газификацию.

Комплексное применение газификации угля и синтеза по Фишеру-Тропшу представляет собой высокоселективную технологию, позволяющую за счет выбора

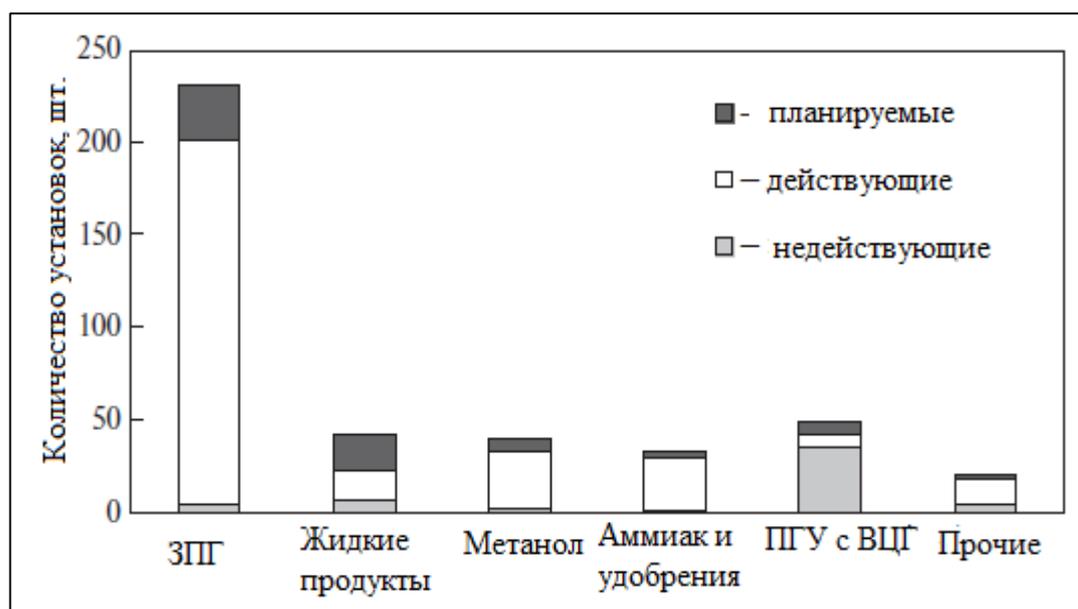
соответствующих технологических параметров получать широкий спектр химической продукции, а также энергетический газ. Состав и теплота сгорания получаемого генераторного газа в значительной степени зависят от условий проведения процесса. К ним можно отнести тип исходного топлива, характеристики газифицирующего агента, температурный режим, тип установки. К окислителям относят воздух, кислород и водяной пар. По целевому применению получаемого генераторного газа зависит и выбор окислителя, и способ газификации угля. Для получения синтез-газа с высоким содержанием водорода и окиси углерода, используемого в качестве сырья для химической промышленности, применяется парокислородное дутьё. Если необходим экономичный газ для нужд энергетики и промышленности, тогда используют паровоздушное или воздушное дутьё. В последнем случае процесс проводят без дорогостоящей установки для разделения воздуха. На рисунке 1.10 показана распределение установок газификации твердого топлива по типу исходного топлива [61].



**Рисунок 1.10.** – Диаграмма распределения реакторов газификации по типам твердого топлива: а) реализованные проекты; б) установленная мощность в расчете на энергогазифицируемого топлива

Как видно из представленной диаграммы, основная часть твердотопливных реакторов работают на угле, и их доля составляет примерно 63 % от общего числа реакторов, при этом они производят более 79 % всей энергии, получаемой от газификации топлива. Область использования продуктов газификации угля приведены на рисунке 1.11, где представлены действующие, неработающие и планируемые к запуску реакторы, производящие генераторный газ. Из рисунка видно, что большинство реакторов ориентированы на производство заменителей природного газа и особенно для химической промышленности для производства таких веществ как: метанол, аммиак и карбамид.

Обзор литературы показал, что используемые методы переработки угля [85-91], являются сложными процессами, поскольку для их осуществления требуются подготовка угля, термохимическое разрушение его макромолекул на более простые и подвижные фрагменты (рис. 1.12).



**Рисунок 1.11.** – Соотношение газогенераторов угля по основным направлениям использования [66]

Предлагаются решить представленные задачи тремя традиционными направлениями: гидрогенизацией, пиролизом, газификацией угля. Гидрогенизация угля представляет собой процесс прямого присоединения водорода под давлением. Пиролиз угля - процесс перераспределения водорода между летучими продуктами

и твердым остатком. Газификация угля процесс окисления с использованием водяного пара, в результате которого образуется смесь  $\text{CO} + \text{H}_2$ , применяемая для синтеза жидких продуктов по процессу Фишера-Тропша. Данный способ также используется для производства водорода.



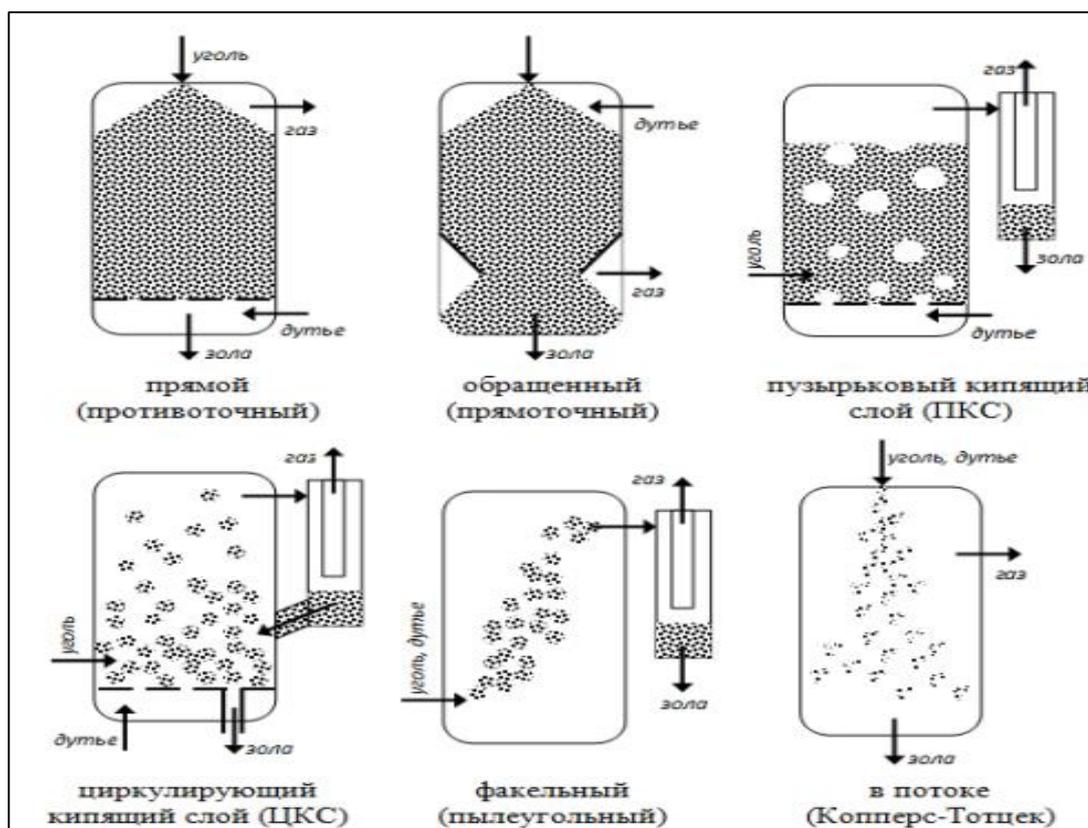
**Рисунок 1.12.** - Схема получения продуктов в процессе переработки угля

Анализ процессов переработки угля [92] указывают на такие её преимущества как: стабильность и надежность, высокий КПД, низкое потребление кислорода, возможность переработки лигнита, реактивных топлив, низкосортных углей с высокой степенью зольности и влажности, удаление сухой золы и др., которые делают применение углей более привлекательными в использовании.

### 1.5. Типы применяемых газогенераторов для газификации угля

Создателем первого газогенератора считается французский инженер, профессор механики Парижской школы мостов и дорог Филипп Леблон, который в 1788 году открыл горючий газ, в 1794 году получил патент на аппарат получения генераторного газа, в 1799 году разрешение на постройку завода, а еще через два года в 1801 году на проект поршневого двигателя, работающего на генераторном газе [66].

Первоначально газификация угля осуществлялась в специализированных установках, конструкция и принцип действия которых варьируется в зависимости от типа применяемого процесса [89]. На рисунке 1.13 представлены основные современные схемы организации процесса газификации угля [86]. Описание указанных методов газификации и ключевых технологий представлено в таблице 1.7. Среди распространённых технологий газификации угля наибольшее распространение получил процесс, реализуемый в плотном слое.



**Рисунок 1.13.** – Технологические схемы газификации угля [86]

Наиболее отработанным и надежным в эксплуатации считается вариант газификации угля в плотном слое под давлением. В мировой практике отсутствуют примеры использования газогенераторов для газификации угля с зольностью ниже 3,5-3,7 %. Это связано с тем, что низкая зольность угля ограничивает его применение в данной технологии: при недостаточном содержании золы затрудняется формирование зольной подушки, необходимой для процесса газификации угля [90].

**Таблица 1.7.** - Описание методов газификации угля и ключевых технологий (примеры) [70]

Способ газификации угля	Типичные представители	Мощность, мВт/т	Вид дутья	Преимущества	Недостатки	Размер частиц, мм	Калорийность газа, МДж/нм <sup>3</sup>
Прямой (противоточный)	Volund Babcock Winkler Lurgi BGL	0,03-10,0	Воздух	Техническая простота, низкая чувствительность к влажности топлива, диапазон нагрузки 15-100%	Высокое содержание смол и запыленность газа	10-300	4,2-5,0
Обращенный (прямоточный)	Ancur Imbert Bioneer	0,003-1,5	Воздух, Воздух/пар	Сравнительная чистота газа, возможность работы на тощем топливе	Малая единичная мощность, высокие удельные эксплуатационные затраты	10-40	4,5-5,2
ПКС	Renugas BIOSYN Metso,U-Gas	0,3-3,0	Воздух, Воздух/пар Кислород/пар	Высокая интенсивность процесса, возможность связывания серы в слое, применимость для низкосортных топлив	Абразивный износ поверхностей, зашлакование сопел и межсopловых пространств, большой расход энергии на собственные нужды, продолжительный запуск	10-20	4,5-7,1 4,2-6,2 5,5-13,0
ЦКС	Studsvik Pyroflow, U-Gas Urgi HTW	1,0-35,0	Воздух Воздух/пар Кислород/пар	Сравнительная простота процесса	Невысокие показатели эффективности	1-10	4,5-7,1 4,2-6,2 5,5-13,0
Факельный	Shell	10-100	Воздух Воздух/кислород	Высокая чистота синтез-газа	Большие габариты, высокая стоимость	1-10	4,2-5,5 5,5-7,2
В потоке	Shell, Техасо, Carbo-V Prenflo E-Gas	10-300	Кислород/пар Воздух/пар			менее 1	10,1-10,7

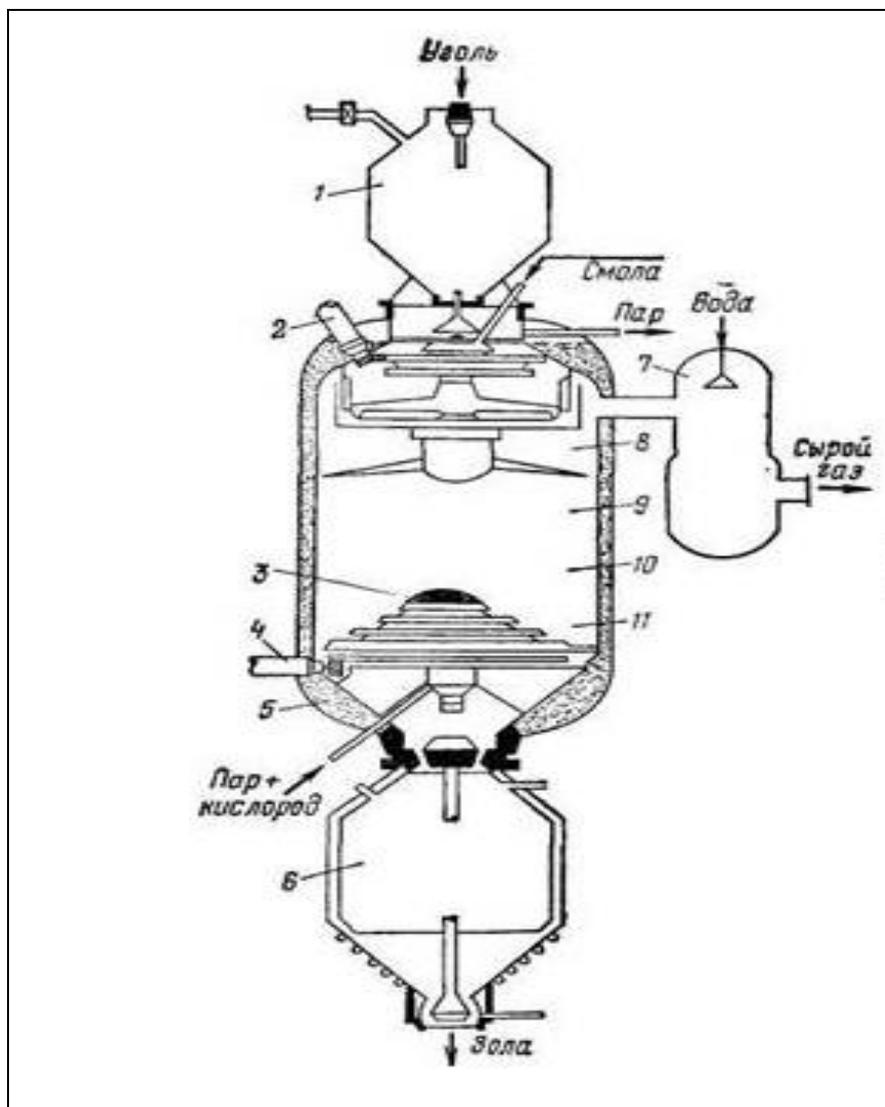
Анализ данных таблицы 1.7 показывает, что предъявляются более строгие требования к размерам частиц угля, и поэтому с увеличением размеров газификационных установок наблюдается повышение средней теплотворной способности получаемого газа.

Наряду с этим возрастает и средняя температура в зоне ядра реактора, составляя: около 900 °С для слоевых противоточных установок, 1100-1200 °С для обращенных слоев, 1000-1100 °С для установок с кипящим слоем, 1500-1600 °С для потоков систем с кислородным дутьем, 1900 °С для горного метода. Размер угольных частиц является важным параметром, определяющим выбор технологии газификации. Использование мелкофракционного и пылевидного угля классифицируют по характеру потока.

Для газификации большого фракционного кускового угля его перерабатывают в стационарном слое: сырьё загружается сверху и медленно опускается, тогда газифицирующие агенты подают снизу вверх. Эффективность теплопередачи данной технологии способствует снижению удельного расхода реагентов и повышению общей эффективности процесса. Используемый режим газификации способствует формированию таких кинетических параметров как: свежее топливо вступает в реакцию с уже частично прореагировавшим газифицирующим агентом, а контактирование углерода состава золы происходит с непрореагировавшим агентом.

На рисунке 1.14 [91] представлена схема газогенератора, предназначенного для газификации угля под давлением с использованием смеси кислорода ( $O_2$ ) с водяным паром. Золоудаление осуществляют в твердом состоянии. Конструкция установки представляет собой вертикальный цилиндрический реактор, функционирующий при давлении 2,5 МПа. Газификационный агент (окислитель) подаётся на встречу потока угля с размерами частиц в пределах 5-30 мм, создавая встречный (противоточный) поток. Проходя через слой горячего шлака, окислитель предварительно нагревается, после чего поступает в зону сгорания кокса. Температура реакции достигается порядка 1000-1200 °С. Образующиеся в данном случае высокотемпературные газы направляют в зону газификации, где

протекают химические эндотермические реакции образования генераторного газа. Основными компонентами полученной газовой смеси являются оксид углерода (CO) и водород (H<sub>2</sub>).

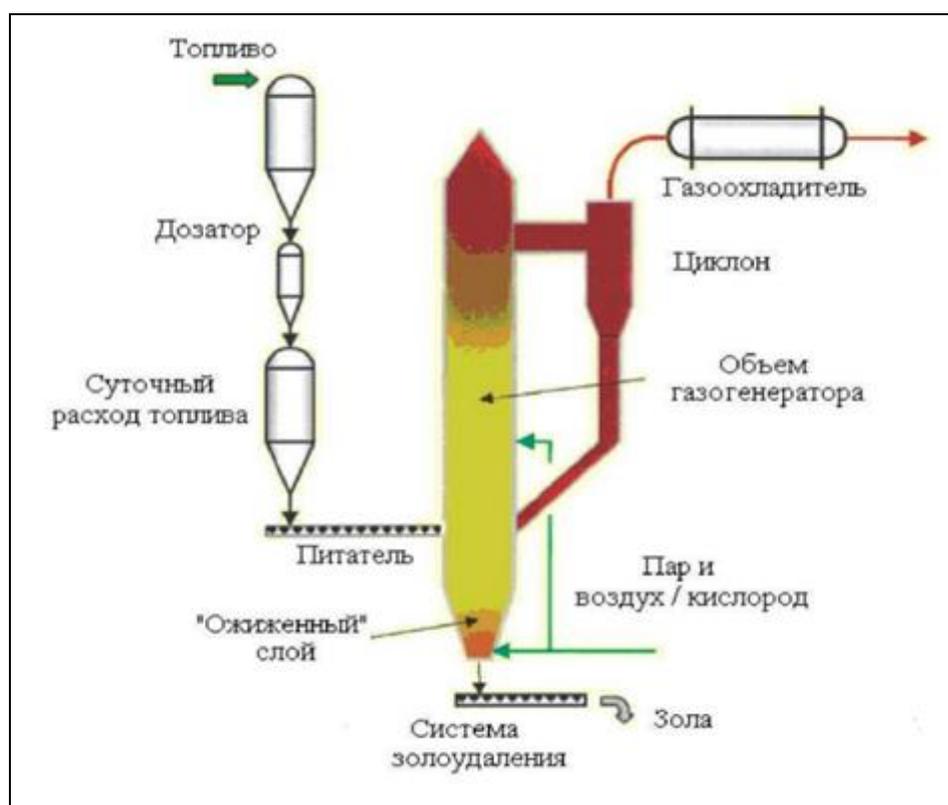


**Рисунок 1.14.** - Генератор технологии LURGY: 1-шлюзовая камера для подачи угля; 2- приводной механизм питателя; 3-колосниковая решётка; 4- привод решетки; 5- охлаждающая водяная рубашка; 6-шлюзовая камера для удаления золы; 7-скруббер-охладитель; 8-зона сушки топлива; 9- зона нагрева угля; 10-зона газификации угля; 11- зона горения топлива

Тем не менее, представленный генератор не соответствует современным требованиям, предъявляемым к декарбонизированному производству, поскольку

характеризуется высоким уровнем загрязнения газа пылью и смолами. Для его очистки требуется применение сложных и энергоемких систем газоочистки. Установка также демонстрирует низкий уровень конверсии водяного пара, сопровождается образованием значительного объема сточных вод и требует существенных затрат на их обработку.

Схема газогенератора, реализованного по технологии «Winkler», представлена на рисунке 1.15 [92].

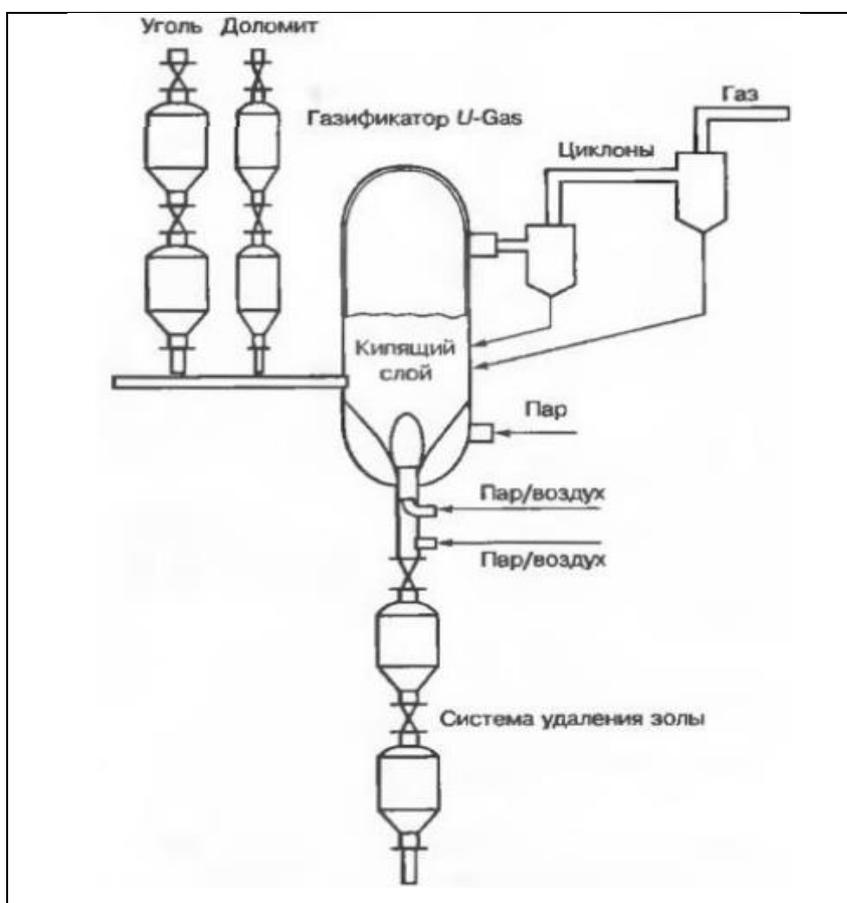


**Рисунок 1.15.** – Газогенератор системы «Winkler» [92]

Необходимо отметить, что представленный газогенератор функционирует на мелкодисперсном угле в режиме кипящего слоя. Газификационный процесс осуществляется за счет сжигания части угля, при этом температура в реакторе поддерживается как при атмосферном, так и при повышенном давлении и составляет 750-800 °С. Реакция газификации угля проходит при атмосферном или повышенном давлении (до 1.3 МПа). Конверсия углерода достигает до 90%.

Основными недостатками данной технологии являются повышенное содержание диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) в горючем газе, а также значительный унос твердых частиц угля с газовым потоком.

Одним из широко используемых в промышленности газогенераторов являются установка, работающие по технологии U-Gas [68]. Газогенератор данной конструкции (рис.1.16) предназначен для переработки угольных частиц размерами до 6 мм. Однако, отмечается что также в процессе используют фракции угля с размерами 1-1,5 мм, которые предварительно сушатся до остаточной влажности менее 5 %. Затем топливо подаётся в реактор совместно с сорбентом в виде доломита. Процесс осуществляется при температуре в диапазоне 900-1040 °С.



**Рисунок 1.16.** – Схема установки U-Gas для газификации угля [68]

Серосодержащие соединения состава газовой смеси предполагается удалять с использованием сорбентов, которые позволяют очистку до 85 %, а оставшуюся часть серосодержащих соединений, которая составляет 10 % удаляют с помощью системы сероочистки. Твёрдые частицы, уносимые генераторным газом,

улавливают в циклонах. После циклонов генераторный газ с температурой 980-1000 °С охлаждается в теплообменнике до 540 °С и поступает на сероочистку. Очистная система выполняется в кипящем слое, далее генераторный газ, проходя фильтры, очищается от пыли. Данный газогенератор имеет сложную систему сероочистки, также полученный генераторный газ из-за присутствия азота в своем составе имеет сравнительно низкую теплотворность.

### 1.6. Влияние состава угля на параметры процесса его газификации

Уголь разных пород отличается не только внешними свойствами, но и технологическими характеристиками [94], которых необходимо учитывать при разработке технологии его газификации. В таблице 1.8 приведены составы угля из некоторых пластов месторождения Фон-Ягноб.

**Таблица 1.8.** – Состав угля месторождения Фон Ягноб и его теплотворность [96]

Индекс пласта	Состав угля, мас. %				Элементный состав, %		Высшая теплота сгорания Q, кКал/кг
	влажность, W	зольность, А	летучие вещества, V	сера, S	С	Н	
16 <sup>а</sup>	1,3-1,5	11-21	36,6-40,3	0,4-1,9	79,06	5,54	7890-8053
16	0,3-0,7	23-37	27,8-35,5	0,6-5,2	84,45	4,20	7061-7986
14	0,1-0,5	14-31	29-36	0,5-2,9	79-82	5,3-5,7	7730-7991
13	0,2-1,6	6-23	32-33	0,5-3,2	81-85	4,9-5,7	7890-8370
12с	0,6-1,2	8-28	32-34	0,6-3,6	82,74	5,57	8002-8210
12в	0,2-1,2	6-26	23-24	0,8-2,0	84,54	4,97	7832-8127
12	0,4-1,4	4-22	27-38	0,4-1,8	81,73	4,96	8001-8312
11	0,7-1,2	7-32	32-31	0,5-1,4	83-85	4,8-5,3	8021-8323
10	0,2-1,4	4-28	31-34	0,4-2,0	84-85	5,0-5,6	8004-8298
9	0,7-1,2	3-24	27-32	0,2-2,0	82-86	5,0-5,6	7986-8463
8	0,4-1,4	10-30	28-30	0,2-1,3	83,79	5,0-5,8	7920-8227
6в	0,4-1,4	3-19	27-34	0,2-1,5	81-83	4,7-5,3	7982-8592

Необходимо отметить, что такие основные характеристики угля как влажность, зольность, летучие вещества и связанный углерод, чаще негативно влияют на процесс газификации угля [95]. Рассмотрим их влияние на процесс газификации угля:

#### ***а) влияние влажности на процесс газификации угля***

Обычно различают три вида влажности угля: 1) свободная вода, образованная из-за дождя или снега; 2) кристаллизационная влажность, образованная соединением молекул угля с водой; 3) адсорбированная вода в структуре угля [97, 98]. Влажность угля отрицательно влияет на процесс газификации угля, т.к. часть тепла расходуется на испарение воды, из-за чего возрастает расход тепла на осуществление процесса газификации.

#### ***б) влияние зольности на процесс газификации угля***

Содержание золы в угле уменьшит содержание газифицирующихся элементов, поэтому, чем меньше золы в составе угля, тем лучше показатели его газификации. Желательно, чтобы зольность газифицирующего угля была ниже 20 %, так как от состава золы зависит температура зольного плавления –это важный фактор для стабильной работы генератора. Из-за воздействия некоторых компонентов состава золы уголь с низкой температурой плавления не может газифицироваться. Когда содержание золы слишком много, слои горючих материалов легко ослабляются или застревают, вызывая неравномерную газификацию угля. При зольности меньше 10 % уголь лучше газифицируется.

#### ***в) влияние летучих компонентов на процесс газификации угля***

В процессе нагрева угля, в зависимости от температуры, происходит газификация составляющих летучих веществ, в результате чего выделяются водород, метан, различные углеводородные соединения, смолы, водяной пар и другие компоненты. Удаление летучих веществ способствует увеличению пористости углеродной матрицы-основного компонента, вовлеченного в газификацию. Повышенная пористость улучшает реакционную способность топлива, что положительно сказывается на эффективности процесса. Кроме того, уголь с высоким содержанием связанного углерода характеризуется высокой теплотворной способностью, что также способствует интенсификации процесса газификации угля.

#### ***г) влияние гранулометрического состава угля на процесс его газификации***

Размер частиц угля для газификации должен выбираться таким образом, чтобы создавать более развитую поверхность для взаимодействия с газифицирующими веществами (водяной пар, воздух, кислород), но не так, чтобы создавалось сопротивление слоя угля движением этих веществ. Обычно наличие угольной пыли создают такое сопротивление. Опытным определён размер частиц угля для газификации рекомендуется в пределах 10-50 мм [99].

### **1.7. Опыт применения газификация угля на предприятиях Таджикистана**

Согласно работам [100, 101] на алюминиевом заводе компании ТалКо Республики Таджикистан из-за отсутствия природного газа были установлены газогенераторы китайской компании ХУАН ТАЙ, обеспечивающие газификацию угля месторождения Фон-Ягноб. В процессе газификации угля формируется генераторный газ, который отличается стабильными энергетическими характеристиками и пригоден для использования в производственных технологических процессах. Вырабатываемый газ с применением газогенераторов компании ХУАН ТАЙ, нашел практическое применение непосредственно в производственном цикле алюминиевого завода, расположенного на территории города Турсунзаде (Таджикистан). В частности, генераторный газ успешно использовался в качестве энергоносителя при изготовлении обожжённых анодов, применяемых в электролизёрах для получения алюминия.

Применение данного газа позволило обеспечить равномерное и стабильное теплоснабжение в процессе обжига анодов, что является критически важным для поддержания качества продукции и предотвращения технологических дефектов. Кроме того, использование генераторного газа способствовало общей энергоэффективности производственного процесса, так как обеспечивалась рациональное использование топлива с заранее заданными характеристиками и минимальными потерями тепловой энергии. Таким образом, внедрение газогенераторов компании ХУАН ТАЙ на базе местного угля позволило не только компенсировать нехватку природного газа, но и создать более экологически и экономически эффективный цикл производства алюминия на предприятии.

Показатели удельного расхода окислителей, а также физико-химический состав получаемого генераторного газа приведены в таблице 1.9.

**Таблица 1.9.** - Расходы окислителей и составы генераторного газа [101]

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /кг	Расход пара, кг/кг	Состав генераторного газа, об. %						Теплота сгорания газа, мДж/м <sup>3</sup>	Степень конверсии угля, %
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
2,7	0,4	6,9	13,7	22,9	2,5	0,3	53,7	5,27	90,4
	0,5	7,8	14,5	21,7	2,6	0,3	53,1	5,24	91,4
2,9	0,4	9,3	11,7	20,5	2,4	0,2	55,9	5,13	92,9
	0,5	9,4	12,3	19,8	2,5	0,3	55,7	4,72	93,8
3,1	0,4	11,1	12,1	18,2	2,5	0,3	56,3	4,50	93,0
	0,5	10,7	12,7	17,9	2,6	0,3	56,0	4,49	93,5
3,3	0,4	12,1	11,2	17,6	2,4	0,4	58,0	4,16	91,2
	0,5	12,5	10,8	16,2	2,6	0,4	59,3	3,93	91,9
3,5	0,4	12,8	9,4	15,4	2,7	0,4	59,3	3,93	89,1
	0,5	13,5	10,4	14,0	2,7	0,4	59,0	3,86	88,9

Анализ данных таблицы 1.9 показывает, что с возрастанием общего расхода водяного пара и воздуха степень конверсии угля практически не изменяется, в составе генераторного газа содержание теплотворных газов (CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) всего 27,5-39,4 % и теплотворность такого газа 3,86-5,27 мДж/м<sup>3</sup>, что очень низка. Возможно, причиной такого низкого качества газификации угля была в том, что производство было организовано по традиционной технологии газификации угля без проведения предварительных научно-технических исследований по определению параметров газификации угля и их оптимизации, а с целью обеспечения производства обожжённых анодов в газовом энергоносителе не зависимо от его эффективности.

## **1.8. Заключение по литературному обзору и задачи настоящей работы**

При обсуждении перспектив развития экономики страны большое внимание уделяется проблеме перехода к устойчивому энергетическому будущему, который включает целый комплекс вопросов, прежде всего отвечающие требованиям экологии, безопасности и доступности первичных энергоресурсов. Вопросы по борьбе с глобальным потеплением и сокращение выбросов углекислого газа и других парниковых газов в атмосферу при использовании энергоресурсов необходимо учитывать при разработке новых технологий углепользования. Необходимо отметить, что для Таджикистана промышленные и энергетические предприятия являются крупнейшими потребителями топливно-энергетических ресурсов, затраты которых в себестоимости продукции составляют более 20 % [30]. Решение комплексного использования угля необходимо осуществлять путем замены импортируемых топлив в страну местным топливом, т.е. углём, а также одновременно следует выполнять требования международного Соглашения по сокращению выбросов в атмосферу парниковых газов [27]. Поэтому, необходимо учитывать способы решения вышеназванных требований путем создания новых комбинированных процессов, использованию новых аппаратов, учитывающих все вопросы комплексности использования состава угля, предусматривающих рациональное использование как органической, так и минеральной составной части его состава в соответствии экологически чистым технологиям переработки угля.

В настоящее время, когда макроэкономика страны является сложной и неоднозначной, потенциал и развитие промышленности будет определяться не только доступом к ресурсам, но и доступам к прорывным, передовым технологиям, которые способны обеспечить безусловное конкретное преимущество при прочих равных условиях использования местного и дешёвого угля. Комплексное использование местного угля, безальтернативного топлива страны, является выгодным как для получения энергоносителя, так и сырья для энергетической, строительной, химико-металлургической и обрабатывающей отраслях, которые на сегодня являются флагманом развития экономики Таджикистана. Перспективы

освоения практики рационального пользования запасов угля, одним из месторождений который является месторождение Фон-Ягноб, должны стать действенными стратегическими инструментами повышения устойчивости развития региональной экономики на основе эффективности комплексного использования органической и минеральной составляющих угля. Каждое месторождение угля уникально по своему физико-химическому составу, поэтому необходим технологический базис и локальные надстройки в зависимости от особенностей ресурсного месторождения. Другим, не маловажным фактором, является необходимость найти замену импортируемому из Республики Узбекистан природный газ, который не может полностью обеспечить выполнение намеченных планов в развитии отраслей промышленности. Также рост цен на нефть и природный газ сильно влияет на состояние экономики страны. В связи с чем, заметно возрастает интерес к использованию доступного и дешевого угля в качестве энергоносителя. Как уже отмечалось, уголь является одним из наиболее неблагоприятных для окружающей среды видом ископаемого топлива, поскольку его сжигание сопровождается повышенными выбросами вредных веществ.

Применение экологически безопасных технологий использования угля для производства энергии и химических продуктов способствует значительному сокращению объемов отходов и загрязняющих выбросов в атмосферу. Внедрение методов комплексной переработки твердого топлива, включая его газификацию, позволяет повысить топливную эффективность использования угля и расширить сферы его промышленного применения. Новые технологии переработки угля должны повысить экологическую безопасность, экономическую и энергетическую эффективность его использования и расширить сферу применения материалов и веществ, полученных из угля. Необходимость разработки таких технологий применительно к переработке конкретного угля месторождений Таджикистана определила цель и задачи выполнения данной научно-исследовательской работы.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФОН ЯГНОБ

### 2.1. Исследуемые материалы и их составы

Основным исследуемым материалом является уголь из месторождения Фон-Ягноб (Таджикистан). Основные характеристики состава и свойств данного угля приведены в главе 1 данной работы. Также, при изложении результатов исследования будет указан состав исследуемой пробы угля. В исследованиях использовали воздушно-сухие навески угля. Размер частиц угля при его газификации зависит от условия проведения исследования, но он не превышал 10 мм. На рисунке 2.1 показано фото пробы угля Фон-Ягнобского месторождения.



**Рисунок 2.1.** – Фотопробы исследуемого угля месторождения Фон Ягноб

Для газификации угля использованы водяной пар и воздух. Для проведения химических анализов по определению составов исследуемых проб угля использовали соответствующие химические реактивы, применяемые в химических анализах органических веществ. Анализы были проведены на аналитических пробах угля и других исследуемых веществ.

В исследованиях определены составы используемых проб угля, генераторного газа, летучих и смолистых веществ угля при его термолизе, золы угля после его газификации. Характеристики генераторного газа даны согласно его вещественному составу, а теплотворность генераторного газа определена по теплотворностям и содержаниям теплотворных газов его состава. Генераторный газ, благодаря своему составу и теплотворной способности, может быть использован: а) в качестве энергоносителя для производства электроэнергии и тепловой энергии; б) как химический реагент в процессах синтеза химических веществ, таких как аммиака, карбамида и другие; в) в роли восстановительного газа при металлургической переработки рудных концентратов, например, полиметаллического концентрата месторождения Кони Мансур.

## **2.2. Методы исследования, установки и измерительные приборы**

Методы определения свойств исследуемых веществ зависят от цели исследования. Основная цель исследования является проведение газификации угля Фон-Ягнобского месторождения и определение при этом основных характеристик процесса газификации, состава и свойств генераторного газа. Устройство реактора и порядок проведения газификации угля описаны ниже.

Термолиз угля осуществлён проведением термогравиметрического анализа исследуемых проб. При термолизе угля определили степень выхода летучих веществ. Термогравиметрический анализ является методом исследования, основанный на регистрации изменений массы образца при его термическом разложении. Современные ТГА – приборы обеспечивают высокоточную фиксацию как массы, так и температуры исследуемой навески угля в ходе нагрева. Температурная программа эксперимента реализуется, как при изотермических, так и при неизотермических условиях. Данные термического разложения угля используются для оценки кинетических параметров процесса разложения угля при нагреве. Основными критериями исследования являются: максимальная температура и скорость нагрева угля.

Термолиз угля осуществлялся в атмосфере инертного газа аргон, а также с использованием газовой смеси  $O_2/N_2$ . В экспериментах использован термогравиметрический анализатор Labsys Evo (рис.2.2) при условии неизотермического нагрева со скоростью 5 и 10 °C/с. Масса угольной пробы составляла 10 мг и средний размер частиц угля 150 мкм.



**Рисунок 2.2.** - Термогравиметрическая система анализа Labsys Evo

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе температура повышалась от комнатной (25 °C) до 40 °C, после чего образец выдерживался при данной температуре в течение 15 минут для стабилизации термического режима. На втором этапе образцы в закрытых тиглях подвергались нагреву от 40 °C до  $915 \pm 3$  °C. В ходе экспериментов использовались две скорости нагрева 5 и 10 °C/с. Во время нагревания прибор автоматически взвешивал тигли и регистрировал данные с помощью специализированного программного обеспечения. Для создания нейтральной атмосферы в камеру подавался аргон со скоростью потока от 0,4 до 1,4 объемов камеры в минуту. В случае применения окислительной газовой среды (смесь  $O_2/N_2$ ), расход газа составлял от 1,3 до 1,4 объемов в минуту.

Расчет параметров исследуемого образца осуществлялся на основе данных, полученных с помощью специализированного программного обеспечения. Программа фиксировала и отображала значения массы угольных проб (мг), скорость нагрева ( $^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ), температуру ( $^{\circ}\text{C}$ ) и время (с). Все параметры регистрировались с определенной периодичностью на протяжении всего заранее запрограммированного температурного режима.

Для определения состава газов был использован газовый хроматограф «Хроматэк-Кристал» (рис. 2.3). Принцип его действия основан на разделении компонентов пробы методом газоадсорбционной, газожидкостной хроматографии и масс-спектрометрии с последующим детектированием и обработкой хроматографических сигналов с помощью программного обеспечения. По режиму работы данный прибор является многократно циклического действия.



**Рисунок 2.3.** – Хроматограф «Хроматэк- Кристал» для определения состава генераторного газа

Исследование теплоёмкости пробы углей проводили методом динамической калориметрии на приборе С-600, оснащённый изопараболической кислородной бомбой, которая объединяет в одном устройстве современную технологию, гибкость и автоматизацию. Принцип действия прибора соответствует стандартам, принятым для бомбовых калориметров. Во всех измерениях начальная температура

устанавливалась на уровне 25 °С. В ходе одного эксперимента определялась температурная зависимость исследуемого параметра. Измерительная система прибора позволяет фиксировать температурные значения в диапазоне от – 100 °С до + 400 °С в заданных точках с использованием потенциометра постоянного тока и переключающего устройства. Диапазон измерения составляет не менее  $10 \times 10^6$  Дж/К·м<sup>3</sup>. Общее время проведения эксперимента в указанном температурном интервале составляет порядка 2,5 часов. Погрешность измерений составляет  $\pm 10\%$ . Теплопроводность исследуемого образца рассчитывалась по следующей формуле:

$$K = \frac{C_{\text{обр}}}{\tau_{\text{ТМ}} - \tau_{\text{Т}}}, \quad (2.1)$$

где  $C_{\text{обр}}$  – полная теплоёмкость исследуемого образца, выраженная в Дж/К·м<sup>3</sup>;  $\tau_{\text{ТМ}}$  – среднее значение тепловой задержки, зафиксированное тепломером в ходе экспериментов с медным образцом, с;  $\tau_{\text{Т}}$  – среднее значение тепловой задержки, определенное при измерениях с пустой ампулой, с.

В ходе исследований для измерения массы проб использовались классические весы марки Rapido производство Германии (рис. 2.4) и электронные весы марки AND GR-200 (Max210g, Vin 10 mg, e=1mg, d=0,1 mg) (рис. 2.5).



**Рисунок 2.4.** – Классические весы Rapido (Germany)



**Рисунок 2.5.** – Электронные весы AND GR-200 (Max210 г., Vin 10 мг, e=1мг, d=0,1 мг)

Аналитические весы являются 1 класса точности с внутренней калибровкой и противопадовковым боксом, обладают возможностью автоматически адаптироваться к сквознякам и вибрации. Наибольший предел взвешивания 210 г при дискретности 0.1 мг. Для выполнения исследовательских работ использованы также набор сит, сушильный шкаф марки Escocell 325 и дозатор проб.

Используя набор сит, представленный на рисунке 2.6, определяли гранулометрический состав угля.



**Рисунок 2.6.** – Набор сит

Гранулометрический состав угля необходим для оценки его качества и пригодности применения в различных исследованиях термоллиза и газификации угля. Процентное содержание различных размеров фракций использовались в исследованиях по определению горючести угля, влажности и зольности угля. Определение процентного содержания разных фракций помогает судить о его горючести, влажности, зольности и других свойствах.

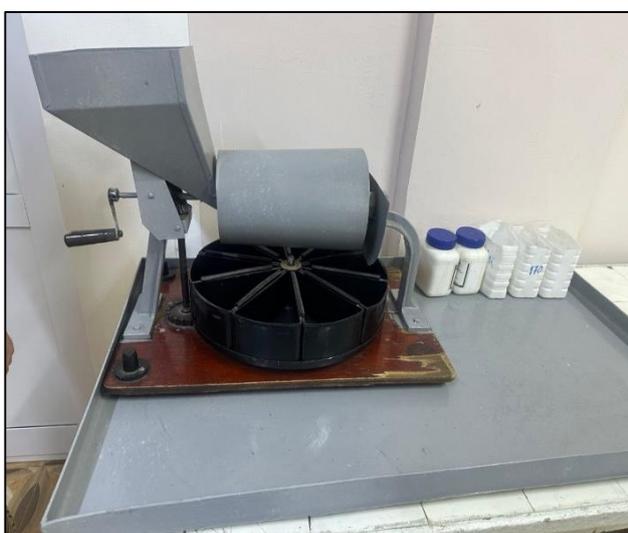
Определение показателей качества влажного угля может привести к различным погрешностям. В связи с этим в ходе анализа проб угля проводили её постепенную подсушку до сухого состояния с использованием сушильного шкафа Escocell 325, показанного на рисунке 2.7.



**Рисунок 2.7.** - Сушильный шкаф Escocell 325

Высушенную пробу угля подвергали измельчению в лабораторной мельнице дисперсного типа с целью получения навески однородного гранулометрического состава. После измельчения материал проходил процедуру классификации по крупности частиц посредством просеивания через стандартное аналитическое сито с размерами ячеек 0,2 мм, что обеспечивало формирование пробы с контролируемой дисперсностью. Контроль крупности частиц осуществлялся систематически путем периодического ситуационного анализа через стандартное сито с сеткой № 020, что позволило гарантировать соблюдение нормативных требований к гранулометрическому составу проб для последующих исследований.

Для точного дозирования подготовленных образцов в аналитические исследования использовали прецизионный дозатор проб, конструкция которого представлена на рисунке 2.8. Таким образом, комплексная подготовка лабораторной пробы угля к последующему аналитическому анализу включала несколько последовательных этапов: предварительное подсушивание, механическое измельчение, гранулометрическую классификацию и точное дозирование образца, чтобы обеспечивало воспроизводимость результатов и минимизацию ошибок, связанных с неоднородностью исходного материала.



**Рисунок 2.8.** - Прецизионный дозатор проб

Экспериментальные исследования проводились с использованием следующих специализированных лабораторных приборов: кольцевая мельница (Unal 250 CC) для получения однородного состава угольных проб; лабораторный грохот (Retsch AS 200), обеспечивающий точную классификацию посредством вибрационной сепарации; вытяжной шкаф, используемый для безопасного проведения операций с пылегазовыми выбросами; нагревательная установка с магнитной мешалкой и встроенным термостатом Daihan MSH-20 D, позволяющая проводить равномерный термохимический разогрев образца с контролем температуры; также механическая мешалка Heidolph RZR 2021, обеспечивающая гомогенизацию образцов перед исследованиями. Полное измельчение образцов

угля являлось критическим технологическим требованием при подготовке проб Фон Ягнобского месторождения, поскольку однородность гранулометрического состава напрямую влияет на точность последующих аналитических определений, включая термогравиметрический анализ, определение летучих веществ и элементный состав. Недостаточное измельчение могло привести к неравномерному подогреву образца, снижению воспроизводимости результатов и увеличению систематической погрешности измерений. Таким образом, использование комплекса высокоточных лабораторных приборов обеспечивало, как соблюдение строгих требований к подготовке пробы, так и достоверность получаемых экспериментальных данных.

### **2.3. Методика проведения теплофизических исследований характеристик углей**

Исследование теплофизических свойств углей является важной технологической и эксплуатационной характеристикой при изучении процесса газификации и термоллиза углей. Теплотворность углей характеризует ее энергетическую ценность.

Исследование эффективной теплоемкости углей проводили методом динамической калориметрии на приборе С-600, оснащённый изопараболической кислородной бомбой. Принцип действия прибора соответствует стандартам, принятым для калориметров. Во всех измерениях начальная температура составляла 25 °С. В ходе одного опыта определялась температурная зависимость исследуемого параметра. Измерительная схема прибора обеспечивает регистрацию температуры в фиксированных точках в диапазоне от -100 °С до + 400 °С с использованием потенциометра постоянного тока и переключающего устройства. Диапазон измеряемых величин составляет не менее  $10 \times 10^6$  Дж/К·м<sup>3</sup>. Продолжительность эксперимента при указанном температурном режиме составляет примерно 2,5 часа. Погрешность измерений соответствует паспортным данным и составляет  $\pm 10$  %.

## **2.4. Технологическая характеристика исследуемых проб угля Фон-Ягнобского месторождения**

При огромном запасе угля в Таджикистане результаты исследования свойств угля разных месторождений, даже для угля Фон-Ягнобского месторождения, являются недостаточными для обоснования современных рациональных направлений использования угля.

Имеющиеся литературные сведения [6,7] по Фон-Ягнобскому месторождению не дают полную характеристику угля всех пластов месторождения, поэтому при использовании угля возникает необходимость в проведение конкретных исследований его состава и химико-технологических свойств.

Общепринятые методики применялись при анализе угольных образцов. Низкотемпературную экстракцию проводили спиртобензольной смесью в соотношении 1:1 по методике Грефе на протяжении 3 часов. Для проведения химического анализа золы пробу прокалывали в муфельной печи при температуре 850 °С в течении 3 часов. Элементный состав органической части угля определяли с помощью методов элементного анализа. Сводные данные о составе и свойствах исследованных углей приведены в таблицах 2.1 и 2.2. Согласно полученным результатам, исследуемые угли характеризуются высокой зольностью (более 20%) и содержанием летучих веществ в пределах 20-30%, что соответствует метаморфическим слоям углей.

Результаты по влажности показали, что наименьшую влажность показала проба 2 (2,9 %), которая благоприятно влияет на сжигание угля. Наибольшую влажность показал результат пробы 1 (5,2 %), что снижает эффективную теплоотдачу. Влажность пробы 3 – средний уровень (4 %). Необходимо отметить, что результаты по пробе 2 (2,9 %) являются наиболее сухими и способствуют более высокому КПД при сжигании.

Химическим строением и составом органической массы углей (ОМУ) определяют выход летучих веществ. Определение этих параметров является важным этапом при оценке термической устойчивости угля. Как правило, чем

выше выход летучих веществ, тем ниже его термостойкость, что можно охарактеризовать данный процесс легкостью термического разложения ОМУ.

**Таблица 2.1.** - Характеристика качества углей месторождения Фон-Ягноб

Проба угля	Состав угля, мас. %				Теплота сгорания угля, кКал/кг	
	W	A	V	S	высшая, Q <sub>в</sub>	низшая, Q <sub>н</sub>
1	5,2	3,18	31,6	0,17	6250	6000
2	2,9	20,8	20,7	1,6	7090	6510
3	4,0	23,1	14,4	6,75	7980	7120

**Таблица 2.2.** - Результаты химического анализа угля с месторождения Фон-Ягноб

Проба угля	Элементный состав, %			Н/С	О/С	Функциональный состав, мг-экв/г ОМУ			Выход спиртобензольного экстракта, %
	С	Н	О+N			COOH	ОН	СО	
1	75,4	5,54	19,06	0,61	0,31	0,55	1,10	1,04	5,0
2	84,6	4,20	11,20	0,50	0,12	0,10	0,19	0,40	3,3
3	86,8	4,7	8,50	0,85	0,18	0,01	0,54	0,28	2,5

Существенным показателем, влияющим на состав угля, также является содержание общей серы, поскольку её концентрация определяет возможные направления промышленного применения угля. Согласно аналитическим данным (табл. 2.1), во всех исследованных образцах присутствует сера (S), относящаяся к средне сернистым категориям.

На основе элементного состава органическую массу угля можно вычислить по формуле Д.И. Менделеева [22]

$$Q_s = 81C + 300H - 26(O-S), \quad (2.2)$$

Q<sub>s</sub> - органическая масса угля; C, H, O S - соответственно содержание элементов, входящих в составе органической массы угля.

Результаты исследований показали, что наибольшим содержанием кислорода в атомном соотношении O/C характеризуется для углей месторождения Фон Ягноб и распределение кислорода по функциональным группам (табл.2.2) показывает, что карбоксильные, фенольные и карбонильные группы свидетельствуют о его химической зрелости.

Определение неорганических составляющих угольного сырья требует детального изучения комплексности в использования и переработки угля, внедрение малоотходных и безотходных технологий его переработки, а также обеспечение экологической безопасности. Важным направлением в решении технологических и экологических задач является также определение содержания неорганических макроэлементов в самом угле и в продуктах его сгорания – золе.

Результаты анализа химического состава золы исследуемых углей приведены в таблице 2.3.

**Таблица 2.3.** – Химический состав золы углей Фон-Ягнобского месторождения

Проба угля	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	I <sub>0</sub>
1	72,1	14,4	9,5	2,2	0,2	0,3	0,3	0,8	0,2	0,15
2	60,2	5,3	16,5	6,4	5,6	0,2	2,2	2,2	1,4	0,50
3	50,4	25,9	5,3	6,8	5,2	0,7	1,0	4,0	0,7	0,23

Анализ химического состава золя угля показывает, что содержание основных оксидов, входящих в минеральную часть углей, варьируется в различных соотношениях. Расчет значений I<sub>0</sub>, производился по формуле [23]:

$$I_0 = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3) \quad (2.3).$$

Для всех исследованных образцов угля значение I<sub>0</sub> оказалось меньше единицы, что свидетельствует о низкой основности золы. Согласно соотношению оксидов, пробы 1 и 2 можно отнести к малоглинозёмным углям, тогда как проба 3 соответствует категории средне глинозёмным углям.

Приведённые характеристики состава и свойств угля Фон-Ягнобского месторождения показывают, что он является слабоспекающимся и по технологическим характеристикам может быть использован для газификации и получения генераторного газа, синтез газа, восстановительного и энергетического газов и других веществ.

## **2.5. Технологические аспекты использования энергетическо-сырьевого потенциала угля**

Комплексное энергохимическое использование твердых топлив ставит перед собой две, по существу, совершенно различные задачи. Первой задачей является рациональное использование органической и минеральной частей твердых топлив. Второй задачей является использование теплового потенциала угля, который может быть получен при сжигании данного сорта топлива. Решение первой задачи заключается в эффективном использовании продуктов органической массы твердого топлива, например, через коксование и сжигание полукокса, и с другой стороны, к использованию минеральной части угля-зола для производства тех или иных ценных строительных материалов, например, цемента [102]. Первая задача является более сложной. При сжигании топлива мы можем достичь определенного нагрева продуктов сжигания, который зависит от концентрации кислорода в дутье, от составов окислителя и топлива, также и от условий сжигания. В зависимости от того, каким путем и для каких целей используется далее тепло продуктов горения угля, можно в различной степени использовать их тепловой потенциал.

Многие химические, металлургические и другие процессы могут протекать только при строго заданном температурном режиме, иначе они либо неосуществимы, либо не отвечают заданным показателям по качеству продукции или по производительности получаемого тепла [103, 104]. Таковы многочисленные химические процессы, в том числе производства карбида кальция  $\text{CaC}_2$ , обжиг цементного клинкера, коагулянтов, минеральных удобрений, восстановление окислов металлов и т.д. Многие химические процессы и реакции сами по себе слабо экзо- или эндотермичны. Однако, доведения реагирующих или перерабатывающих

веществ до заданной температуры требует значительного расхода высокопотенциального тепла, который можно получить при использовании инновационных технологий по переработке угля в теплотворные газы [104-106].

Использование новых современных технологий переработки угля для производства тепла и химических продуктов, как правило, является выгодным как в экономическом, так и экологическом значении. Одним из эффективных способов использования угля является его газификация и использование продуктов газификации. Интенсификация процесса газификации угля немислима без глубокого понимания её сущности, чтобы на её основе разработать способы получения высокотеплотворных генераторных газов, в том числе водорода, высокоэффективного и чистого энергоносителя, других веществ состава угля с тем, чтобы использовать согласно их составу в производстве материалов. При этом, важным является знание реакционных свойств углерода, основного теплотворного элемента состава угля, при различных температурах и давлениях, а также его физико-химических свойств.

Необходимо отметить, что реакционная способность углерода состава угля является предметом исследования не только для традиционных процессов, как горение и газификация топлива, но и при использовании углерода как высокотемпературного конструкционного материала. Высокая тепло- и электропроводность графита, низкий коэффициент линейного расширения, его высокая термическая стойкость позволяют широко использовать его в разнообразных областях техники, в медицине и биологии. В настоящее время графит широко применяется в атомной энергетике, в каналах импульсных МГД-генераторов для горячих электродов, в адсорбционной и ракетной технике и в ряде других областей. Газы, образующиеся в процессе газификации угля, находят широкое применение в химической промышленности. Особенно необходимо отметить, что их используют в качестве технологического сырья для синтеза таких веществ как: аммиак, карбамид, метанол и других. В настоящее время они активно используются в качестве энергетического топлива для производства электрической

и тепловой энергии, а также в роли восстановительного газа в металлургических процессах и других отраслях промышленности.

Спектр использования генераторного газа очень большой. Следует отметить, что имея уголь, можно всегда газифицируя его, получить газовую смесь, состоящую из CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S и др., которые как по теплотворности, так и по химическому составу, могут заменить природный газ в качестве энергоносителя в энергетической отрасли, но и как сырьё в химической промышленности. При этом, газификацию угля следует провести по более эффективным технологиям, разработка которых и являлась предметом нижеуказанных исследований.

## **ГЛАВА 3. ТЕРМОЛИЗ УГЛЯ ФОН ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА**

### **3.1. Термолиз угля Фон-Ягнобского месторождения для выделения летучих веществ его состава и получения пластифицированного углерода**

В работах [102-104] нами предложены технологии газификации угля, сущность которых заключается в том, что фактически не уголь газифицируется, а углерод его состава, полученного предварительным термолизом угля при температурах выделения всех летучих и смолистых веществ из его состава. Газификация чистого углерода позволяет получить генераторный газ, использование которого в качестве энергоносителя способствует исключению выбросов диоксида углерода в атмосферу. Результаты по газификации углерода изложены в следующей главе данной работы, здесь приводим результаты термолиза угля для получения чистого углерода, опубликованные в работах [105-107].

Процесс термолиза угля исследован с целью выделения летучих и смолистых веществ его состава, определение их количества и вещественный состав. Первоначально, процесс термолиза угля был проведён на установке, состоящей из трубчатой печи, соединённая с водяным холодильником, и оснащённая системой электронагревателя, регулируемой автоматически для создания постоянной температуры. При определённых температурах и времени выделения летучих и смолистых веществ взвешиванием их конденсированных количеств, а также измерением объёма выделяемых газов, определили скорость процесса термолиза с определением количеств выделяемых веществ и газов. Процесс термолиза заканчивался при температуре, при которой отсутствует выделение указанных веществ. Первоначально, из состава угля испаряется вода, затем летучие и смолистые вещества в зависимости от температуры их газообразования. Процесс их конденсации протекает в обратном направлении при их охлаждении в водяном холодильнике. Процесс термолиза угля изучался методом

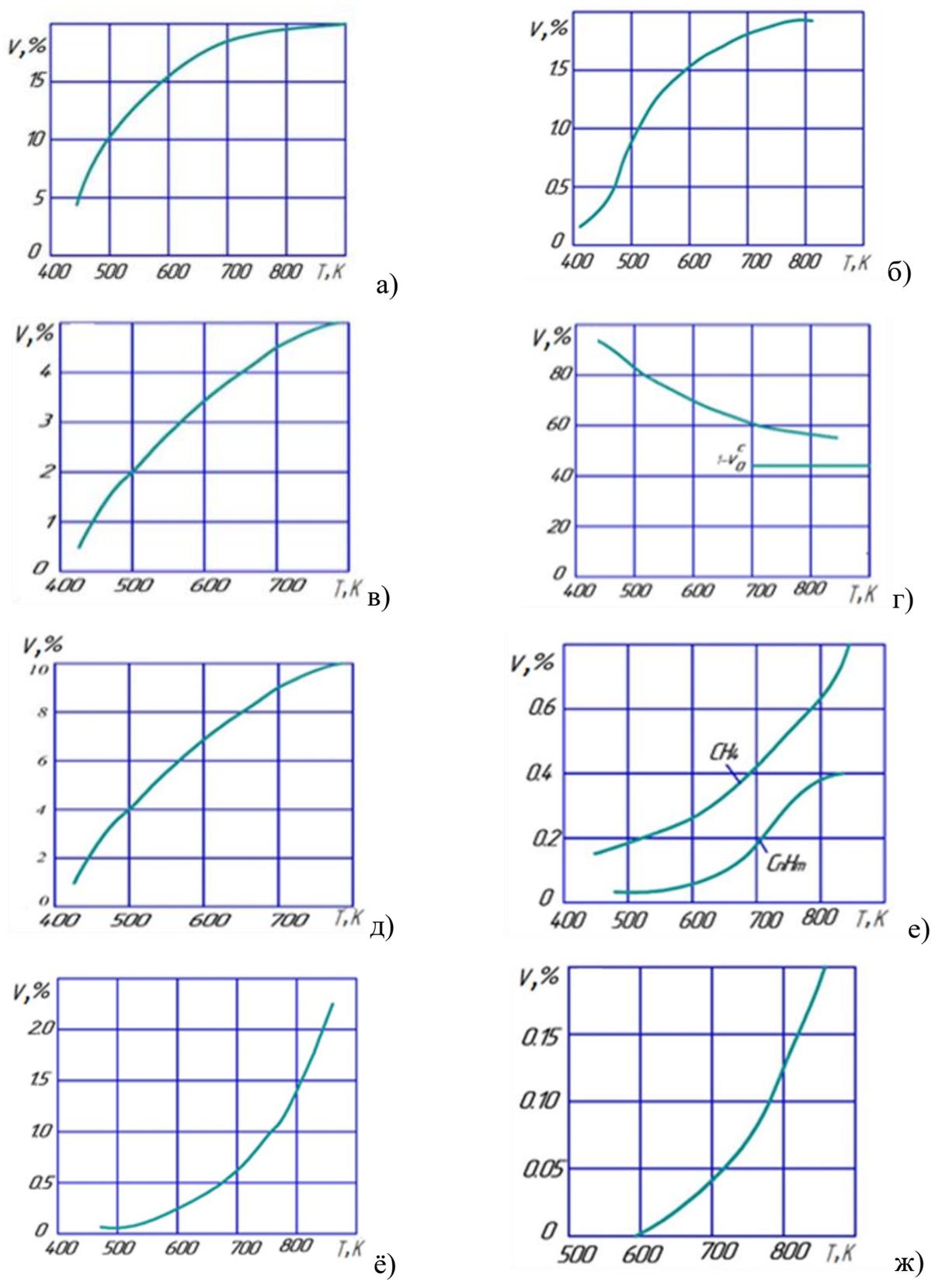
термогравиметрического анализа с использованием прибора Labsys Evo при неизотермическом нагреве со скоростями 5 и 10 °С /с. Полученные результаты, представленные в работах [105-107], приведены ниже.

### 3.2. Термолиз угля с использованием трубчатой печи

В работе [6] приведены результаты подробного изучения состава угля различных проб пластов Фон-Ягнобского месторождения. Для проведения процесса термолиза преимущественно использовалась проба угля данного месторождения со следующим средним составом (масс. %): С – 81,0; Н – 5,2; N – 1,0; О – 2,0; S – 1,4; зола – 5,3; влажность угля – 4,0; содержание летучих веществ 0,98 %; содержание смолы 4,5 %. При нагревании до температуры 550 °С из состава угля были выделены летучие и смолистые компоненты, состав которых впоследствии подвергался анализу. Численные значения выхода продуктов состава угля при его термическом разложении отражают кинетику процесса термолиза угля. Согласно работе [108], протекание процесса термолиза угля можно организовать изотермической и неизотермической схемой, отличающихся легкой математической обработкой.

В качестве основных характеристик исследуемых проб угля отмечены показатели: потери массы образцов в пределах отличающихся температурных интервалах; максимальная температура нагрева угля  $T_{\text{макс.}}$ ; максимальная скорость выделения летучих веществ  $V_{\text{макс.}}$ ; а также константа скорости реакции выделения летучих веществ  $K_{\text{макс.}}$ , соответствующая наибольшей скорости потери массы пробы. Дополнительно определялись предэкспоненциальный множитель  $K_0$  и энергией активации  $E$ , относящиеся к основным стадиям термического разложения угля. В результате исследования кинетики термического разложения угля Фон-Ягнобского месторождения, приведенной ниже, были получены следующие значения:  $V_{\text{макс.}}=31,0 \%$ ;  $E= 30,6$  мДж/моль;  $K_0 =14,2 \text{ с}^{-1}$ .

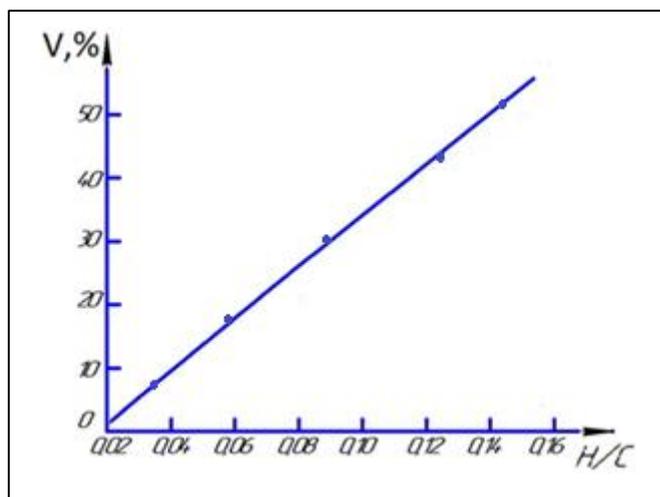
Зависимости скорости выделения летучих веществ от температуры нагрева пробы угля месторождения Фон Ягноб для воды; кислот; смолы; полукокса;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$ ;  $\text{CO}$ ;  $\text{H}_2$  приведена на рисунке 3.1.



**Рисунок 3.1.** - Зависимости выхода летучих веществ от температуры нагрева пробы угля месторождения Фон Ягноб для: а) воды; б) кислот; в) смолы; г) полукокса; д)  $CO_2$ ; е)  $CH_4$  и  $C_nH_m$ ; ё)  $CO$ ; ж)  $H_2$ .

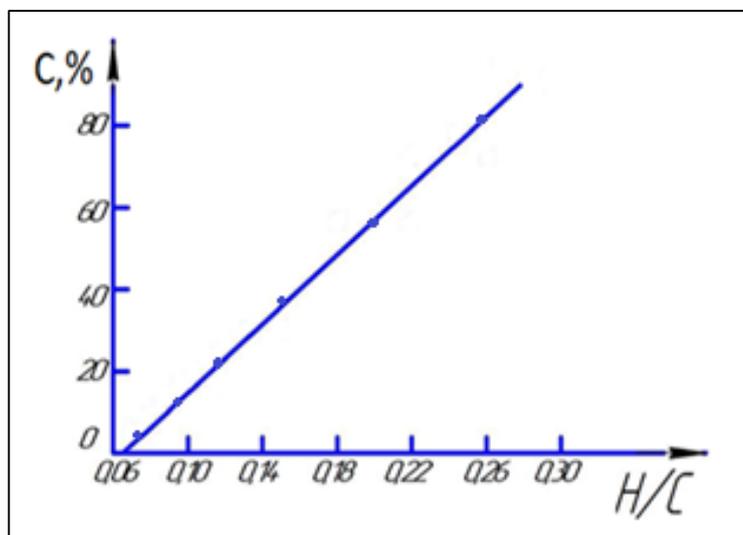
В настоящее время использование угля в качестве энергоносителя требует комплексного подхода к его переработке, что включает в себя тщательное изучение всех выделяемых компонентов при нагревании, так как полученные вещества могут быть использованы согласно их составу и свойствам в различных промышленных производствах. Это связано с тем, что при термическом разложении угля образуется широкий спектр химических соединений и газов. Каждое составляющее вещество обладает определенными физико-химическими свойствами и качествами, позволяющими в дальнейшем его эффективно использовать в качестве полезного продукта.

Знание элементного состава летучих продуктов процесса термолиза имеет важное значение. В частности, содержание углерода и водорода, а также суммарного выхода летучих веществ в зависимости от атомного соотношения водорода к углероду ( $H/C$ ) в их составе. На рисунке 3.2 представлена зависимость объёмного выхода летучих веществ ( $V, \%$ ) от соотношения ( $H/C$ ), а также на рисунке 3.3 показана зависимость выхода углерода ( $C, \%$ ) от того же параметра в составе летучих компонентов



**Рисунок 3.2.** - Зависимость объёма выделяемых летучих веществ от соотношения содержания водорода и углерода в их составе

Зависимость между содержанием водорода и углерода в составе летучих продуктов имеет линейный характер. Кроме того, были исследованы характеристики летучих веществ, зависящие не от атомного соотношения водорода к углерода в пробе, а от топливного коэффициента угля  $\beta$  [110].



**Рисунок 3.3.** – Взаимосвязь между содержанием C и H/C в составе летучих продуктов

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены зависимости относительных содержаний углерода и кислорода в составе летучих веществ от значения топливного коэффициента угля  $\beta$ , рассчитанные на основе соответствующих формул:

$$C/V = 190 \beta + 25 \quad (3.1),$$

$$O/V = 66 - 220 \beta \quad (3.2),$$

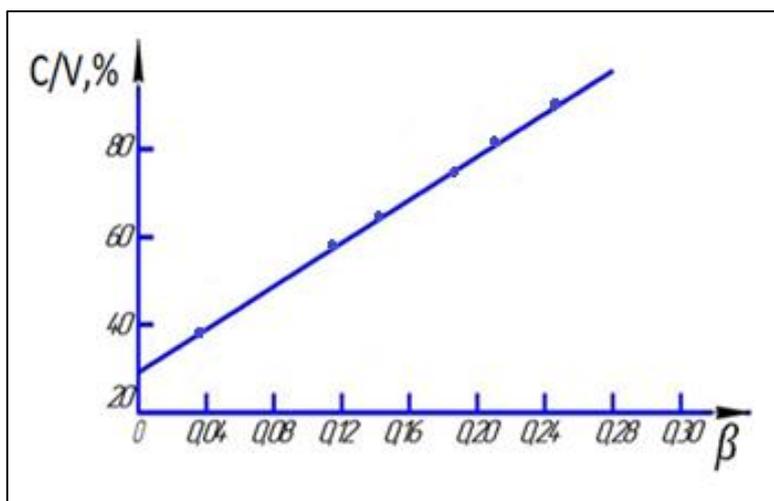
где: C-содержание углерода; O-содержание кислорода; V-объём летучих веществ угля;  $\beta$ -топливный коэффициент угля.

Зависимость значений теплоты сгорания летучих веществ состава угля ( $Q$ , мДж/кг) от значения топливного коэффициента  $\beta$  является важным при оценке энергетического потенциала угля и его пригодности в качестве энергоносителя. Эта зависимость, согласно [110] описывается эмпирической формулой:

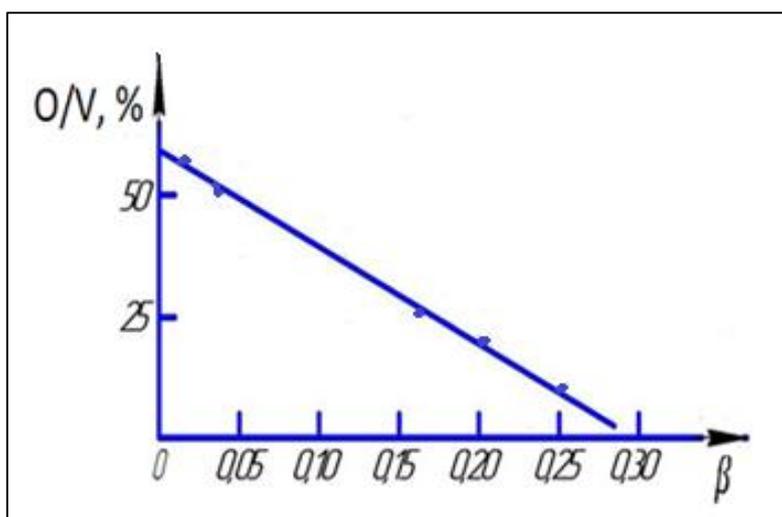
$$Q = 105 \beta + 33 \quad (3.3),$$

где:  $Q$  – теплота сгорания летучих веществ, выраженная в мДж/кг;

$\beta$  – тепловой коэффициент, отражающий соотношение горючих компонентов в составе летучих веществ.



**Рисунок 3.4.** - Относительное содержание углерода в летучих веществах



**Рисунок 3.5.** - Относительное содержание кислорода в летучих веществах

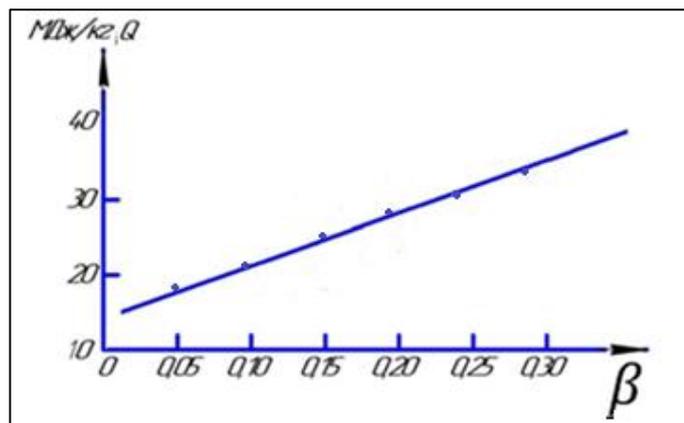
Данная формула позволяет оценить теплотворную способность летучих веществ без необходимости проведения сложных экспериментальных измерений, что особенно важно при предварительной классификации углей различных месторождений.

На рисунке 3.6. графически представлена указанная зависимость, демонстрируя линейную связь между  $\beta$  и Q. Из графика видно, что с увеличением значения топливного коэффициента наблюдается пропорциональное увеличение

теплоты сгорания, что подтверждает важность данного параметра при энергетической оценке углей. В формуле (3.3) значение топливного коэффициента для угля Фон-Ягнобского месторождения рассчитана согласно [110] по формуле

$$\beta = 2,35 (H+O/8)/(C+S +0/375) \quad (3.4),$$

где H, O, C, S - соответственно содержание водорода, кислорода, углерода и серы в составе летучих веществ угля.



**Рисунок 3.6.** - Зависимость значений теплоты сгорания летучих веществ от значения топливного коэффициента угля

При нагреве исследуемой пробы происходит разрыв химических связей в структуре составляющих компонентов угля, что приводит к образованию конечных продуктов разложения. Процесс разрушения угля или выделения летучих веществ может быть описан уравнением реакции первого порядка:

$$d(V/C)/dt = K (1-V/C) \quad (3.5),$$

где V – количество выделяемых веществ при нагреве угля за время t; t – время термообработки угля; C - общее количество веществ, выделяемых при полном разрушении связей веществ состава угля, ( $0 \leq V \leq C$ ); K-константа скорости реакции выделения летучих веществ.

Значение константы скорости реакции рассчитывается на основе уравнения Аррениуса

$$K = K_0 \cdot e^{-E/(RT)}, \quad (3.6)$$

где:  $K_0$  - предэкспоненциальный множитель константы скорости реакции;  $E$  - энергия активации процесса выделения летучих веществ;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - температура в Кельвинах.

Путём интегрирования уравнения (3.5) можно получить выражение, позволяющее рассчитать объём летучих веществ ( $V$ ), выделяющихся в процессе термической обработки угля.

Определение суммарного количества летучих веществ, выделяющееся к моменту времени  $t$  по формуле (3.5), не может полностью определить сложный процесс разложения летучих компонентов при нагреве угля, данная зависимость отражает совокупную кинетику процесса, устанавливая связь с ключевыми параметрами термообработки: температурой и временем. Она была использована в настоящем исследовании при анализе кинетики нагрева угля Фон-Ягнобского месторождения, состав которого приведён выше. Были определены следующие кинетические данные:  $V_{\text{макс.}}=31,0 \%$ ;  $E= 30,6$  мДж/моль;  $K_0 =14,2 \text{ с}^{-1}$ .

Суммарный выход летучих веществ определяли во времени в зависимости от применяемого температурного режима интегрированием уравнения (3.5), а для определения состава летучих веществ можно использовать квазистатический метод расчёта выхода отдельных компонентов их состава. На первом этапе определяется суммарный выход летучих веществ к заданному моменту времени, после чего на основе температуры их разложения рассчитывается выход отдельных компонентов. Эти результаты служат исходной основой для определения состава продуктов термического разложения образца, выделившихся к указанному моменту времени в интервале следующих нагреваемых температур:

- $500 \text{ }^\circ\text{C} - 360 \text{ }^\circ\text{C}$  – каменноугольный пек;
- $360 \text{ }^\circ\text{C} - 270 \text{ }^\circ\text{C}$  – антрацены;
- $270 \text{ }^\circ\text{C} - 230 \text{ }^\circ\text{C}$  – метилнафталены;
- $230 \text{ }^\circ\text{C} - 210 \text{ }^\circ\text{C}$  – нафталеновая фракция;
- $200 \text{ }^\circ\text{C} - 170 \text{ }^\circ\text{C}$  – фенолы и пиридины;
- $170 \text{ }^\circ\text{C} - 90 \text{ }^\circ\text{C}$  – бензол и его гомологи;

- до 100 °С – 9 °С – конденсируются водяные пары и неконденсируемые газы.

Таким образом, основное влияние на состав продуктов нагрева оказывает температурный уровень процесса и время пребывания уже образовавшихся высокомолекулярных продуктов. При нагревании угля в пределах от 90 °С до 500 °С выделяются летучие вещества из состава угля, как отдельные продукты. После выделения летучих веществ остаётся смесь углерода и золы, оставшийся остаток пластифицируется, что будет способствовать благоприятному протеканию газификации углерода при подаче на него окислителей (водяной пар, кислород, воздух или их смеси) при более повышенных температурах, чем температура термолиза угля.

Для разработки экологически безопасных технологий комплексной переработки угля изучение его состава и свойств имеет важное значение. Органическая масса угля представлена атомами углерода, водорода, кислорода, азота и серы. Составляющие формируют ароматические, гидроароматические, гетероциклические и алифатические структуры, включающие функциональные группы  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{-OH}$ ,  $\text{-COOH}$ ,  $\text{-NH}_2$ ,  $\text{SH}$ ,  $\text{C=O}$  [111].

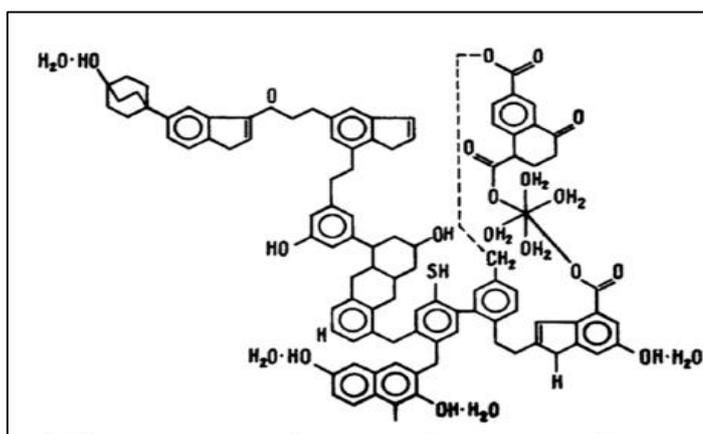
Такие химические элементы как: Na, Ca, Mg, Al, Si, P и другие, присутствующие в виде соединений – кремнезёма ( $\text{SiO}_2$ ), глинозёма ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), глинистых минералов, сульфатов ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ), сульфидов (пирит  $\text{FeS}_2$ ), карбонатов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ), а также оксидов, фосфатов, хлоридов и других металлов составляют неорганическую составляющую часть угля [112]. В процессе сжигания или газификации угля указанные неорганические компоненты разлагаются с образованием соответствующих оксидов, входящих в состав золы.

Термическая деструкция углей под воздействием кислорода отмечается её характерной склонностью к образованию летучих газообразных и жидких веществ, поскольку соединения, содержащие кислород в своем составе, менее устойчивы при повышенных температурах. Он может входить в состав гетероциклических структур, а также кислотных и альдегидных групп. С увеличением содержания кислорода в угле снижается его теплота сгорания. Кислородсодержащие группы

участвуют в формировании химических связей между органической и неорганической частями угля. По мере увеличения степени углеобразования и, соответственно, снижения концентрации кислорода, в боковых радикалах связи типа «углерод-кислород» заменяются на более стабильные «углерод-углерод», что снижает склонность угля к самовозгоранию.

В работах [110, 111] показано, что в состав летучих компонентов угля входят молекулы азота ( $N_2$ ), кислорода ( $O_2$ ), водорода ( $H_2$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ), а также углеводороды, такие как метан ( $CH_4$ ), этилен ( $C_2H_4$ ) и др. Как видно из структурной формулы угля (рис.3.7), углерод преимущественно входит в состав ароматических соединений, тогда как гетероатомы, такие как кислород и сера (O и S), располагаются в боковых цепях, формируя фрагменты гуминовых кислот и битумов.

Выделение токсичных летучих соединений, таких как  $SO_2$ , HCN,  $CS_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ , объясняется наличием в составе угля гетероатомов — это элементы, которые отличаются от углерода. Необходимо отметить, что с увеличением массового содержания того или иного элемента в угле (табл.3.1), в большом количестве он входит в состав летучих продуктов.



**Рисунок 3.7.** - Структурная формула угольного образца

Термическая деструкция углей представляет собой сложный процесс, включающий ряд последовательно - параллельных химических реакций. При создании технологий переработки угля, реализуемых в установках его

использования, важным является эффективное и комплексное использование всех составляющих угля, а также обоснование модели его термохимических превращений.

**Таблица 3.1.** - Содержание гетероатомов в угле

Пробы угля из точек месторождения Фон-Ягноба	Содержание элементов, мас. %		
	O	N	S
16 <sup>a</sup>	15	0,5	0,2
15 <sup>a</sup>	17	1,2	1,5
14 <sup>a</sup>	28	0,8	0,9
12 <sup>c</sup>	10	1,2	2,0
12	16	0,7	1,4
11	30	1,0	1,9

В табл.3.2 приведены общие показатели выхода летучих веществ и температуры их выделения для проб угля.

**Таблица 3.2.** - Обобщённые показатели выхода летучих веществ и температуры их выделения

Уголь Фон Ягнобского месторождения	Выход летучих веществ, об. %	Температура выхода летучих веществ, °C
	30-60	90-450

Исходные данные по скорости реагирования, температурных границах каждой стадии химического превращения могут быть получены на основе экспериментальных данных. Наиболее распространённым экспериментальным методом в подобных исследованиях является метод термогравиметрического анализа (ТГА).

Целью проведенного термогравиметрического анализа является установление модели термохимического превращения угля и количественного определения выхода летучих компонентов из его состава.

### **3.3. Термогравиметрический анализ пробы угля Фон-Ягнобского месторождения**

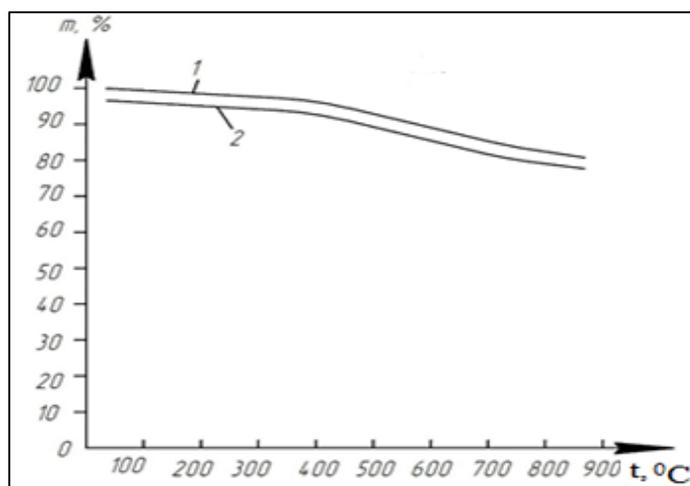
Термогравиметрический анализ угля представляет собой метод исследования, в котором фиксируется изменение массы пробы угля в процессе её термической деструкции. Приборы TGA позволяют с высокой точностью контролировать изменение массы и температуры навески. Температурная программа эксперимента реализуется, как при изотермических, так и при неизотермических условиях. Информация о термическом разложении угля применяется для анализа кинетики его превращений при нагревании. В качестве основных параметров исследования рассматривают максимальную температуру и скорости нагрева угля [113].

Термогравиметрическим способом исследовали выход летучих веществ из состава пробы угля Фон-Ягнобского месторождения. Сведения о содержании сопутствующих компонентов в составе исследуемой угольной пробы представлены в таблице 3.3. Экспериментальные исследования проводились на термогравиметрическом анализаторе Labsys Evo в условиях неизотермического нагрева со скоростью 5 и 10 °C/с. Масса пробы составила 10 мг, а средний размер частиц -150 мкм.

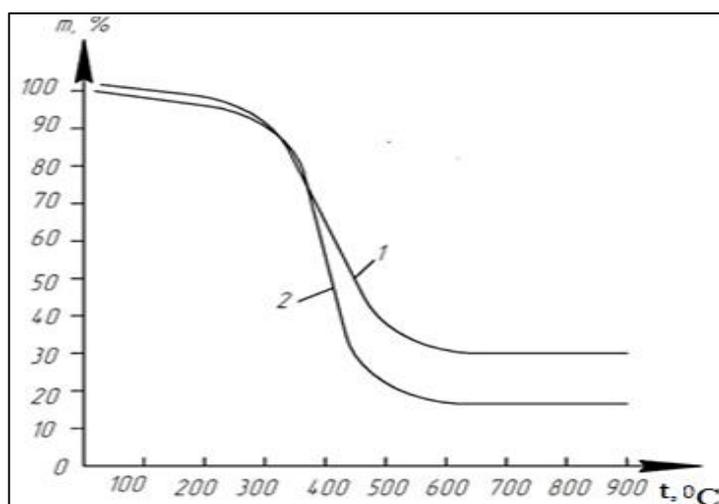
**Таблица 3.3.** - Параметры угольной пробы месторождения Фон-Ягноб, использованной в термогравиметрическом анализе

Исследуемая проба	Зольность угля, А, %	Влажность угля, W, %	Содержание летучих веществ, V, %
Уголь месторождения Фон -Ягноб	5.3	4.0	0,98

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены исходные кривые угольных образцов в атмосфере инертного аргона и в атмосфере газовой смеси кислорода и азота.



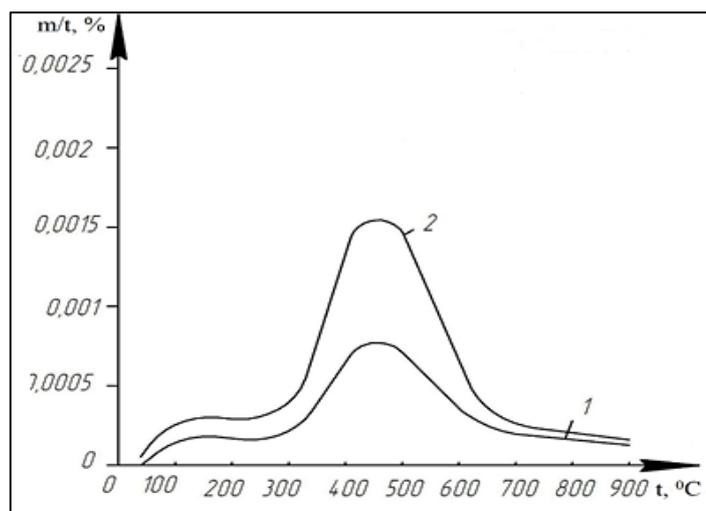
**Рисунок 3.8.** – График изменения массы угля в зависимости от температуры в атмосфере инертного аргона при скоростях нагрева пробы: 1- 5 °C/c; 2- 10 °C/c



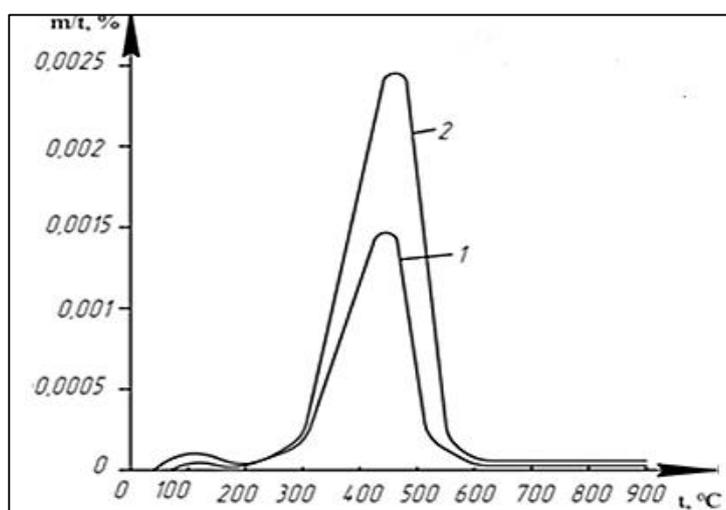
**Рисунок 3.9.** – График изменения массы угля в зависимости от температуры в газовой смеси кислорода и азота при скоростях нагрева пробы: 1- 5 °C/c; 2- 10 °C/c

Графики, представленные на рисунках 3.8 и 3.9, позволяют оценить технические свойства угля. В атмосфере, содержащей смесь  $O_2$  и  $N_2$ , остаточная масса пробы соответствует зольности образца и находится в пределах, близких к значениям, полученным в результате технического анализа. Начиная с температуры 600°C, остаточная масса пробы практически не менялась, что может свидетельствовать о завершении процесса выхода летучих веществ из состава угля.

По характеру кривых нагрева пробы угля в атмосфере аргона можно определить выход летучих компонентов. Потеря массы угольной пробы при достижении температуры 900 °С составила приблизительно 30-33 %. Постепенный нагрев в ТГА приводит к меньшему выходу летучих компонентов, чем при условии быстрого нагрева в муфельной печи в соответствии с принятой методикой проведения анализа. На рисунках 3.10 и 3.11 представлены зависимости скорости снижения массы исследуемых угольных проб в атмосфере инертного газа и в газовой смеси кислорода с азотом.



**Рисунок 3.10.** - Зависимость скорости термического разложения пробы угля от температуры в атмосфере аргона при скоростях нагрева: 1-5°C/c; 2- 10°C/c



**Рисунок 3.11.** – Зависимость скорости термического разложения пробы угля от температуры в газовой смеси  $O_2$  и  $N_2$  при скоростях нагрева: 1-5°C/c; 2- 10°C/c

На этих зависимостях отчётливо прослеживаются два пика, соответствующие испарению влаги и выделению летучих веществ. В условиях окислительной среды, помимо снижения массы за счет выхода летучих компонентов, дополнительно наблюдается уменьшение массы пробы, связанное с выгоранием коксового остатка.

Сравнивая характер выход летучих веществ в разных атмосферных условиях, можно отметить, что в окислительной среде процесс начинается при более низких температурах по сравнению в инертной среде. Максимальное уменьшение массы угольной пробы наблюдается в диапазоне температур 420 °С – 440 °С. Общие потери массы в присутствии кислорода превышают аналогичные показатели в атмосфере аргона, что объясняется окислительным эффектом кислорода. Это различие особенно выражено при низких скоростях нагрева.

Повышение скорости нагрева пробы до 10 °С /с на всех этапах её разложения заметно увеличивает значения максимальной температуры  $T_{\max}$ . При этом разница  $\Delta T_{\max}$  колеблется от 83 °С до 153 °С в атмосфере аргона и от 69 °С до 139 °С в среде кислорода, что соответствует пикам максимальной скорости разрушения угля на дифференциальных кривых ТГА. Увеличение скорости нагрева угля приводит к возрастанию выхода летучих веществ. В атмосфере аргона выделение летучих продолжается на протяжении всего процесса нагрева, но с пониженной скоростью. В окислительной среде процесс выгорания угольной пробы завершается при температуре около 600 °С.

Анализ термических процессов, протекающих в температурном интервале основного разложения компонентов массы угля, позволяет понять, как общие закономерности термохимического поведения угля, так и специфические особенности, характерные для данного типа углеродного сырья. Исследование данного температурного диапазона имеет принципиальное значение, поскольку именно в этой области температур происходит основное структурно-химическое превращение, определяющие характер и скорость протекания реакций нагрева, дегазации и направлении термодеструкции угля. Основным температурный интервал используется для определения кинетических параметров процесса, таких

как энергия активации, константа скорости и порядок реакции, которые несут важную информацию о механизме разложения угольной матрицы. Можно сделать вывод, что определение модели термохимического превращения угля с месторождения Фон-Ягноб с помощью термогравиметрического анализа помогает выявить состав летучих веществ, выделяемых при использовании угля, и способствует их последующему целевому применению. При сравнении процесса выделения летучих веществ в разных средах отмечается, что в окислительной атмосфере этот процесс начинается при более низких температурах, чем в инертной. Максимальное снижение массы угля наблюдается в диапазоне 420 °С – 440 °С. Кроме того, с увеличением скорости нагрева пробы усиливается интенсивность выделения летучих компонентов.

### **3.4. Исследование кинетики окисления пластифицированного углерода кислородом**

После термолиза угля и выделения летучих и смолистых веществ в остатке остаётся пластифицированный углерод с неорганическими компонентами состава угля, которые при сжигании или газификации данного остатка выделяются как зола. Следовательно, при использовании остатка угля после его термолиза для газификации или сжигания, в реакциях с окислителями вступает чистый углерод, который окисляется. Поэтому, важным является исследование механизма окисления углерода в среде окислителей, прежде всего кислорода.

В процессе газификации угля важную роль играет реакция его горения [107], т.е. реакция взаимодействия углерода с кислородом, который может протекать одновременно по двум стадиям, определяющим суммарную скорость всего процесса, так и характер газообразования. Первая стадия — это окисление углерода, а следующей стадией является горение углерода. Реакция горения углерода протекает со скоростью, где концентрация кислорода у реакционной поверхности выше необходимой на 3-4% и температура выше 700-800°С.

Взаимодействие кислорода с углеродом можно описать с позиций теории гетерогенных реакций [109]. Согласно этой теории, процесс окисления углерода

кислородом включает в себя следующие стадии: а) адсорбция окислителя на поверхность адсорбента, т.е. углерода; б) образование на поверхности твердого углерода промежуточного соединения кислорода с углеродом; в) взаимодействие промежуточного соединения с реагентами реакции, т.е. с углеродом и кислородом, с образованием продуктов реакции; г) отвод продуктов реакции от реакционной зоны в газовый поток. Таким образом, реакция окисления углерода протекает слой за слоем до полного его расходования.

Механизм протекания процесса окисления углерода может быть выражена в виде следующих уравнений:



Общая скорость реакции окисления углерода зависит от скорости лимитирующей стадии процесса, т.е. наиболее медленной стадии. Процесс протекает в кинетической области, если лимитирующей стадией процесса является реакция (3.9). Согласно [110], на поверхности твердого адсорбента, в данном случае углерода, может образоваться несколько поверхностных газовых окислов разного состава, но в данном случае наиболее вероятным является образование  $C_2O_4$  и состав образующегося газа определяется реакцией (3.9).

Рассмотрим процесс окисления углерода по реакциям (3.8) и (3.9). В работе [110] показано, что адсорбция окислителя на поверхности углерода протекает при весьма малых давлениях кислорода  $O_2$  и даже при сравнительно высокой температуре. Следовательно, процесс адсорбции окислителя на поверхность углерода практически не влияет на скорость его окисления и на порядок реакции по кислороду. Тогда, кинетическое уравнение реакции (3.8) можно описать как

$$-dC/dt = K_o \cdot (S - S_l), \quad (3.10)$$

$-dC/dt$ - скорость расходования кислорода на поверхности угля по реакции (3.8);  $K_o$ - константа скорости реакции (3.8);  $S$  – реакционная поверхность углерода;  $S_l$ – поверхность углерода, занятая поверхностным окислом  $C_2O_4$ .

Кинетическое уравнение реакции (3.9) можно описать как

$$-dx/dt = K_p \cdot S_l \cdot C, \quad (3.11)$$

$-dx/dt$ - скорость разложения окисла  $C_2O_4$  по реакции (3.9);  $K_p$ - константа скорости реакции (3.9);  $C$ -концентрация кислорода у реакционной поверхности угля. При этом константы скоростей реакций  $K_p$  и  $K_o$  подчиняются уравнению Аррениуса и выражаются следующим образом:

$$K_o = K_{o1} e^{-E_1/RT} \text{ и } K_p = K_{p1} e^{-E_2/RT}, \quad (3.12)$$

$K_{o1}$  и  $K_{p1}$  -соответствующие предэкспоненциальные множители в уравнении Аррениуса;  $E_1$  и  $E_2$  – энергия активации реакции (3.8) и (3.9);  $R$ - универсальная газовая постоянная;  $T$ -температура окисления углерода в Кельвинах.

При установившемся режиме скорость образования поверхностного окисла  $C_2O_4$  и скорость его разложения равны [110]. Тогда общая скорость расхода кислорода на процесс окисления углерода можно представить следующим уравнением

$$-dC/dt = K_p C S / (1 + K_p C / K_o). \quad (3.13)$$

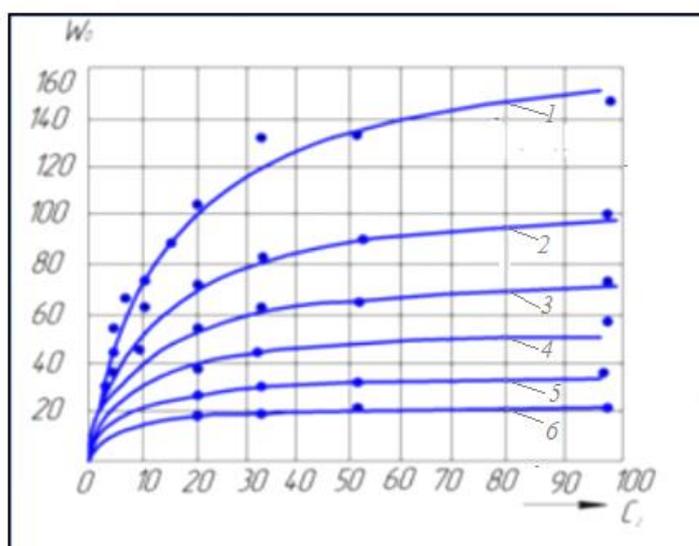
При равенстве скоростей образования поверхностного окисла  $C_2O_4$  и его разложения можно считать, что реакции окисления углерода кислородом протекает в кинетической области, где концентрация кислорода в зоне реакции и в потоке газа равна  $C$ . В таких условиях уравнение (3.13) используется для изучения механизма процесса окисления углерода в экспериментальных исследованиях [112]. Поскольку скоростей реакции (3.7) и (3.8) равны, то концентрация кислорода на поверхности углерода также равна её значению в потоке окислителя, тогда для вычисления удельной скорости реакции окисления углерода, т.е. отнесённой к величине поверхности углерода  $S$  как  $W = (dC/dt)/S$ , уравнение (3.13) примет вид

$$W = (dC/dt)/S = K_p C / (1 + K_p C / K_o). \quad (3.14)$$

Рассматривая поверхностный окисел  $C_2O_4$ , образующийся по реакции (3.8) и способный разлагаться по реакции (3.9), как вполне определенное физико-химическое соединение, следует отметить два важных момента: *а) от характера поверхности угля, т.е. от его активности, должна в сильной мере зависеть*

величина  $E_1$  реакции образования этого поверхностного окисла; б) величина энергии активации разложения этого поверхностного окисла  $E_2$  не должна сильно меняться при окислении различных сортов угля.

Рассматривая уравнение (3.14), необходимо отметить, что при уменьшении значения  $C$ , а также и при уменьшении отношения  $K_p / K_o$ , кажущийся суммарный порядок процесса окисления по кислороду приближается к первому и, наоборот, при увеличении  $K_p / K_o$  или  $C$  суммарный порядок реакции приближается к нулевому. Проверка правильности уравнения (3.14) сделана при экспериментальном исследовании процесса окисления углерода при разной температуре и концентрации кислорода в реакционной смеси. На рисунке 3.12 приведены экспериментальные зависимости скорости окисления углерода, полученные при различной температуре и варьированием концентрации кислорода.

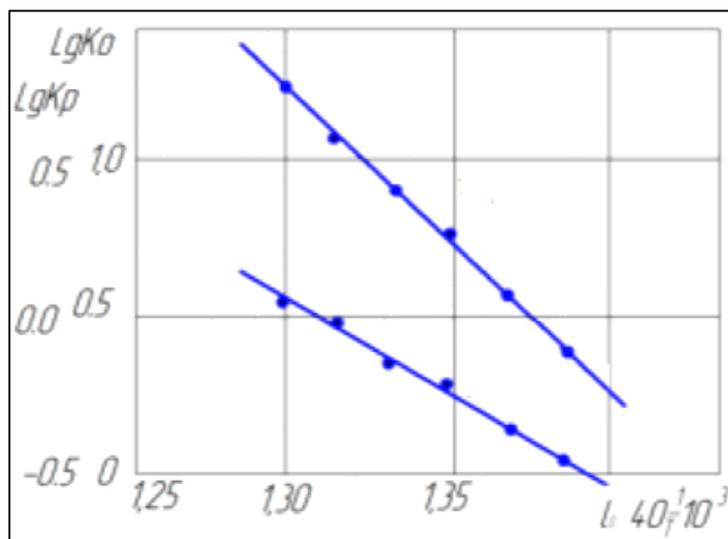


**Рисунок 3.12.** – Зависимость скорости окисления угля от содержания кислорода в реакционной смеси при температурах, °C: 1- 497; 2- 487; 3-477; 4-467; 5-457; 6-720

На рисунке 3.13 приведены зависимости константы скорости ( $K_o$ ) и ( $K_p$ ) от значений обратной температуры  $1/T$ .

Из анализа углов наклона температурных зависимостей было определено, что для реакции (3.8) значение энергии активации  $E_1 = 180$  кДж/моль, а для реакции

(3.9)  $E_2 = 197$  кДж/моль. Небольшая разница между этими величинами, составляющая всего 9,4 %, свидетельствует о схожей энергетической природе данных процессов. Это позволяет заключить, что реакции (3.8) и (3.9), соответствующие стадиям образования и разложения поверхностного окислителя, находятся в псевдоравновесном состоянии и не оказывают определяющего влияния на общую скорость окисления углерода.



**Рисунок 3.13.** – Зависимость константы скорости образования  $C_2O_4$  ( $K_0$ ) и разложения  $C_2O_4$  ( $K_p$ ) от значение обратной температуры процесса окисления углерода

Вышеприведённые результаты и их анализ позволяют предположить, что именно реакция (3.10) является лимитирующей стадией в механизме гетерогенного окисления углерода. На этой стадии происходит непосредственное взаимодействие кислорода с активными центрами углеродной поверхности, сопровождающееся образованием оксидов углерода ( $CO$  и  $CO_2$ ). Данный этап характеризуется наибольшим энергетическим барьером, что согласуется с кинетическими зависимостями, полученными экспериментально. Удельная скорость окисления углерода кислородом может быть количественно описана кинетическим уравнением (3.14), отражающим функциональную зависимость скорости реакции от температуры и парциального давления кислорода. Это уравнение показывает, что температурный фактор определяет экспоненциальный

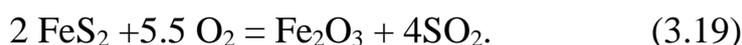
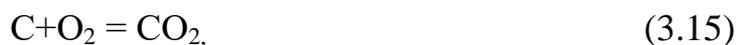
рост скорости реакции с повышением температуры, а константа скорости включает структурно-химические параметры угля. Полученные значения энергии активации и установленные закономерности свидетельствуют о том, что процесс окисления углерода имеет комплексный многостадийный характер, включающий как химическую адсорбцию кислорода на поверхности частиц угля, так и последующую реакцию трансформации образовавшихся комплексов. Таким образом, проведенный анализ позволяет более глубоко понять механизм взаимодействия кислорода с углеродом и определит основные факторы, влияющие на кинетику процесса, что имеет важное значение для оптимизации условий газификации и высокотемпературного окисления угля.

### **3.5. Материальный и тепловой балансы процесса газификации угля**

Обычно для определения оптимальных параметров любого химического производства проводят расчёты материально-теплового баланса. Ниже приведены данные по составлению такого баланса применительно к газификации угля с тем, чтобы показать порядок его составления и определения параметров по расходу сырьевых материалов и приходу полученных веществ, а также тепловые расходы с определением количеств топлива для обеспечения нормального протекания процесса превращения твердого топлива в газ.

Материально-тепловой баланс проведён применительно к газификации угля, а не углерода его состава, исходя из того положения, что уголь многокомпонентное вещество и при его газификации протекают много реакций, чем при газификации углерода. Знание порядка материально-теплового баланса газификации угля облегчает проведение такого расчёта применительно к газификации углерода, где газифицирующим элементом является только углерод, в то же время в процессе газификации угля наряду с углеродом (С) ещё газифицируются и другие элементы состава угля. Результаты материально-теплового баланса угля опубликованы в работе [102].

Расчёт материально-теплового баланса газификации угля проведён с учётом протекания следующих основных химических реакций окисления элементов:



Балансы элементарных реакций позволяют рассчитать массовые расходы кислорода и количества продуктов реакции, приходящие на единицу массы рассматриваемого образца. Знание плотности газов дает возможность перейти от массовых единиц к объемным. Расчеты проводились при нормальных физических условиях. Плотность газов приведена в таблице 3.4.

**Таблица 3.4.** - Плотность газов при нормальных физических условиях

Значение плотности газа, $\rho$ в кг/м <sup>3</sup>							
O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>пар</sub>	SO <sub>2</sub>
1.429	1.257	1.293	1.977	1.25	0.089	0.804	2.927

Для каждой из приведённых реакций можно составить материальный баланс, позволяющий определить расход окислителя, в нашем случае газовый кислород и на его основе рассчитать необходимое количество воздуха. Суммируя все уравнения, получают итоговое выражение, позволяющее рассчитать теоретически необходимого объема воздуха для полного окисления углерода до CO<sub>2</sub>

$$V = 0.0889 \cdot C + 0.265 \cdot (H - 1/8 \cdot O) + K_B \cdot S, \quad (3.20)$$

$K_B$  -коэффициент расхода воздуха, его значение  $K_B = 0.033$ - для органической серы;  $K_B = 0.0456$ -для колчеданной серы.

Для исследуемой пробы угля в расчетной формуле значение коэффициента расхода воздуха было принято  $K_B = 0.033$ , а под  $S$  принято суммарное процентное содержание в топливе органической и колчеданной серы. В формуле (3.20) также

учитывается собственный кислород топлива. Предполагается, что имеющийся в топливе кислород связан с водородом топлива. Поэтому содержание в топливе свободного водорода равно  $H-1/8O$ . Объем азота учитывается как суммарное количество азота состава угля и азота состава воздуха, подающий в газогенератор, тогда с учётом этих положений формула (3.20) примет вид

$$V = 0.0866 \frac{C}{100} + \frac{0.375S}{100} + 0.79V^0 + 0.008N. \quad (3.21)$$

Отдельно объемы  $CO_2$ ,  $SO_2$  и  $N_2$  равны ( $m^3/kg$ ):  $V_{CO_2} = 1.866C^p/100$  (среднее значение для органической и колчеданной серы)

$$V^0_{N_2} = 0.79V^0 + 0.8N^p/100 \quad (3.22)$$

Объем водяных паров определяют по формуле ( $m^3/kg$ )

$$V^0_{H_2O} = 0.0124(9H^p + W^p) + 0.016 V^0 \quad (3.23)$$

Коэффициент 9 в формулу (3.23) ввели в связи с тем, что при химической реакции водяного пара получается по массе в девять раз больше, чем израсходован водород. Иногда бывает необходимо учитывать также водяные пары, вносимые в генератор паровоздушным способом газификацией угля.

После сложения объема сухих газов с объемом водяных паров получим полный объем газов при теоретическом расходе воздуха

$$V^0_{г} = V^0_{с.г.} + V^0_{H_2O}. \quad (3.24)$$

Исследование показало, что в газогенератор всегда подается воздуха больше, чем теоретически необходимо для газификации. Действительный расход воздуха на сжигание 1 кг угля записывается следующим образом

$$V_B = \alpha V^0 \quad (3.25)$$

где  $\alpha$ - коэффициент избытка воздуха.

Определение коэффициента избытка воздуха по составу продуктов сгорания угля рассматривается при условии: а) для  $\alpha > 1$  в правую часть формулы (3.24) нужно прибавить избыточное количество воздуха

$$V^0_{г} = V^0_{с.г.} + V^0_{H_2O} + (\alpha - 1) V^0. \quad (3.26)$$

При рассмотрении газификации угля объемы воздуха и продуктов сгорания относят к  $1\text{ м}^3$  исходного газа. При сжигании угля протекают реакции горения водорода, окиси углерода, метана, серы (3.15) – (3.19).

Тепловой баланс процесса горения топлива составляли для определения температуры газов в процессе газификации для выделения их из состава углей и использование их по назначению согласно полученным температурным градиентам. При газификации угля в адиабатических условиях при избытке воздуха (с заданной исходной температурой) произведен точный расчет с учетом зависимостей теплоёмкости газов от температуры. Если процесс газификации угля происходит при постоянном давлении, то берется удельная теплоемкость  $C_p$ . В этом случае суммарная энтальпия продуктов термоллиза угля  $I$  за вычетом энтальпии подаваемого воздуха  $I_B$  приравнивается теплоте газификации:

$$I \cdot T_a - I_B \cdot T_o = Q, \quad (3.27)$$

$T_o$  – начальная температура процесса горения угля;  $T_a$  -температура газа при термоллизе угля;  $Q$ - тепло реакции термоллиза угля.

Тепло реакции горения угля вычисляется как сумма тепла реакции всех элементов состава угля для 1 кг или  $1\text{ м}^3$  как

$$I \cdot T_a = V_{H_2O} I_{H_2O} \cdot T_a + V_{CO_2} I_{CO_2} T_a + V_{N_2} I_{N_2} T_a + V_{SO_2} I_{SO_2} (T_a + V_{O_2} I_{O_2} T_a). \quad (3.28)$$

Значения энтальпии  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  и воздуха (в  $\text{мДж/м}^3$ ) при нескольких температурах приведены в таблице 3.5.

**Таблица 3.5.** - Значения энтальпии газов в процессе газификации угля

Газ	Энтальпия газов при температуре, °С			
	300	500	1000	1500
$H_2O$	1.72	2.78	3.93	5.15
$CO_2$	2.20	3.50	4.84	6.20
$N_2$	1.39	2.16	2.96	3.78
Воздух	1.44	2.25	3.06	3.91

В формуле (3.28) значения энтальпии газов умножаются на соответствующие объемы газов в расчете на 1 кг угля. Суммарная энтальпия также отнесена к 1 кг угля. Иногда при составлении теплового баланса возникает необходимость в учете физической теплоты топлива и теплосодержания золы, уносимого газами.

Полученные результаты балансов газификации угля были привязаны к составу смеси выделяемых веществ. Температурный градиент режима охлаждения выделенных летучих веществ позволяет осуществить полное разделение смеси на чистые компоненты. Выше было отмечено, при каких температурах конденсируются компоненты состава летучих веществ. Приводим здесь температуры конденсации этих веществ. При нагреве угля Фон-ягнобского месторождения до 700 °С в газогенераторе и охлаждения выделяемых веществ их разделение на фракции происходит в следующем порядке: 500–360 °С – каменноугольный пек; 360–270 °С – антрацены; 270–230 °С – метилнафталены; 230–210 °С – нафталиновая фракция; 200–170 °С – фенолы и пиридины; 170–90 °С – бензол и его гомологи; до 100–90 °С – конденсируются водяные пары и неконденсируемые газы. Расчеты материального и теплового балансов термического разложения образцов углей месторождения Фон-Ягноб были выполнены с целью определения оптимальных параметров процессов при газификации угля, обеспечивающих максимальную эффективность преобразования топлива в газообразные продукты. В основе расчетов лежат основные химические реакции окисления элементов, входящих в состав угля прежде всего углерода (С), водорода (Н), серы (S) и азота (N). В данном исследовании рассматривались реакции полного и неполного окисления, а также процессы образования оксидов, характерные для термического преобразования топлива в присутствии кислорода, содержащегося в воздухе. В таблице 3.6. приведены результаты расчетов по составу продуктов газификации угля Фон Ягнобского месторождения от режимов газификации углерода.

При анализе газификации угля в различных режимах с учетом температурной зависимости теплоемкости газов были проведены балансовые расчеты, которые позволяют определить массовый расход кислорода и количество продуктов реакции, приходящихся на единицу массы исследуемого образца.

**Таблица 3.6.** – Содержание продуктов от режима газификации углерода

Режим газификации углерода	Содержание основных продуктов процесса газификации углерода, об. %						Теплотворная способность газа, мДж/м <sup>3</sup>
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
Полное окисление	21,0	99,0	0,0	0,0	0,0	-	-
Неполное окисление (воздушное)	5-7	10-15	15-25	10-12	2-3	45-50	4,0-5,5
Парокислородная газификация	0-3	5-10	20-30	25-35	5-8	25-30	10,5-12,0
Чистая газификация	0	3-5	20-25	40-50	8-10	10-15	12,5-14,0

Анализ приведенных данных показывает, что характер протекающих реакций и состав конечных продуктов существенно зависят от температуры, типа подаваемого окислителя и соотношения фаз. При переходе от полного к неполному окислению наблюдается увеличение доли восстановительных компонентов (CO и H<sub>2</sub>), что сопровождается ростом теплотворной способности генераторного газа.

### **3.6. Заключение по результатам третьей главы**

Проведён термолиз угля Фон-Ягнобского месторождения в обычной трубчатой печи и термогравиметрическим способом, который показал, что при температурах до 600-700 °С из состава угля выделяются все летучие и смолистые вещества и углерод, как основная органическая масса состава угля,

пластифицируется. Окисление пластифицированного углерода кислородом протекает по механизму образования промежуточного соединения  $C_2O_4$ , разлагающего затем до  $CO_2$ . Кинетика окисления углерода в исследуемых пределах использования соотношения  $C: O_2$  в основном описывается уравнением первого порядка.

Определена зависимость значений теплоты сгорания летучих веществ угля ( $Q$ , мДж/кг) от значения топливного коэффициента, который является одним из важных параметров оценки энергетического потенциала угля и его пригодности для газификации и получения генераторного газа. Данное исследование особенно актуально при разработке технологических решений по переработке угля, а также при сравнительном анализе топлива из разных месторождений.

Использование разработанных режимов термолиза угля открывает широкие возможности для целенаправленного получения не только газообразных продуктов, но и твердого остатка в виде высокодисперсного чистого углерода (C), газифицируя его получить  $H_2$  и CO как ключевых компонентов генераторного газа. Продукты газификации водород ( $H_2$ ) и окись углерода (CO) обладают высокой теплотворной способностью и могут использоваться как эффективные энергоносители при производстве тепла, электрической энергии, а также в качестве топлива для двигателей и турбин в газовых установках. В химической промышленности водород широко используется при производстве аммиака, метанола, синтетических жидких топлив, для гидроочистки нефтепродуктов, а также в перспективных водородных энергетических технологиях.

Установлен оптимальный режим газификации углерода при сбалансированном сочетании реакций окисления и восстановления, когда подача окислителя обеспечивает необходимый тепловой эффект, но не приводит к избыточному образованию двуокиси углерода ( $CO_2$ ). Подобный подход позволяет повысить степень конверсии углерода, увеличить удельный выход генераторного газа, а также обеспечит энергоэффективность и экологическую устойчивость процесса переработки углей Фон-Ягнобского месторождения.

## ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ ФОН-ЯГНОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Анализ научной литературы, проведенный в первой главе, показал, что большинство исследований процессов газификации угля сосредоточены на преобразовании угля в горючий газ без учета выделения летучих и смолистых веществ. Состав и свойства генераторного газа зависят от состава угля, который является многокомпонентным и изменчивым, что приводит к вариативности состава получаемого газа. В исследовании [114] предпринята попытка переработки угля с целью получения жидких топлив и горючих газов путём приготовления масляно-угольной суспензии из пылевидного угля и тяжёлого масла, полукоксования этой суспензии в реакторе под давлением 5 МПа в температурном диапазоне 500-680 °С с использованием перегретого водяного пара (до 900 °С) в качестве теплоносителя, сепарации полукокса от парогазовой смеси, на бензиновую и газойлевую фракции, а также тяжёлого масла для получения синтез-газа, его охлаждения и очистки. Однако, данный метод газификации угля является многостадийным и требует использования дорогих тяжёлых масел для приготовления угольно-масляной суспензии, ограничивает перечень получаемых продуктов (бензин-газойлевый состав и синтез газ), а также характеризуется неполной переработкой угля и высокими затратами материально-энергетических ресурсов, что делает его промышленное применение маловероятным. Поэтому, газификацию угля надо привести по малозатратным технологиям, обеспечивающих получению генераторного газа и всех продуктов состава угля без выброса отходов.

Процесс термолиза угля Фон-Ягнобского месторождения был исследован с тем, чтобы подготовить предпосылки для осуществления газификации углерода, полученного из угля выделением летучих и смолистых веществ. В отличие от газификации угля без выделения названных веществ, когда газифицируется

многокомпонентное вещество с протеканием многочисленных химических реакций и образованием многокомпонентного генераторного газа, газификация углерода окислителем или окислителями протекает при осуществлении малочисленных реакций с участием углерода и некоторых образующихся веществ, например оксида углерода CO, с образованием генераторного газа определённого состава, имеющего целенаправленного назначения. Основная концепция предварительного удаления летучих и смолистых веществ из угля перед процессом газификации углерода была изложена в работе [115]. В последующих исследованиях [102, 116] эта идея получила дальнейшее развитие и нашла отражение в настоящем исследовании. Предложена ресурсосберегающая и многофункциональная технология переработки угля месторождения Фон-Ягноб [117].

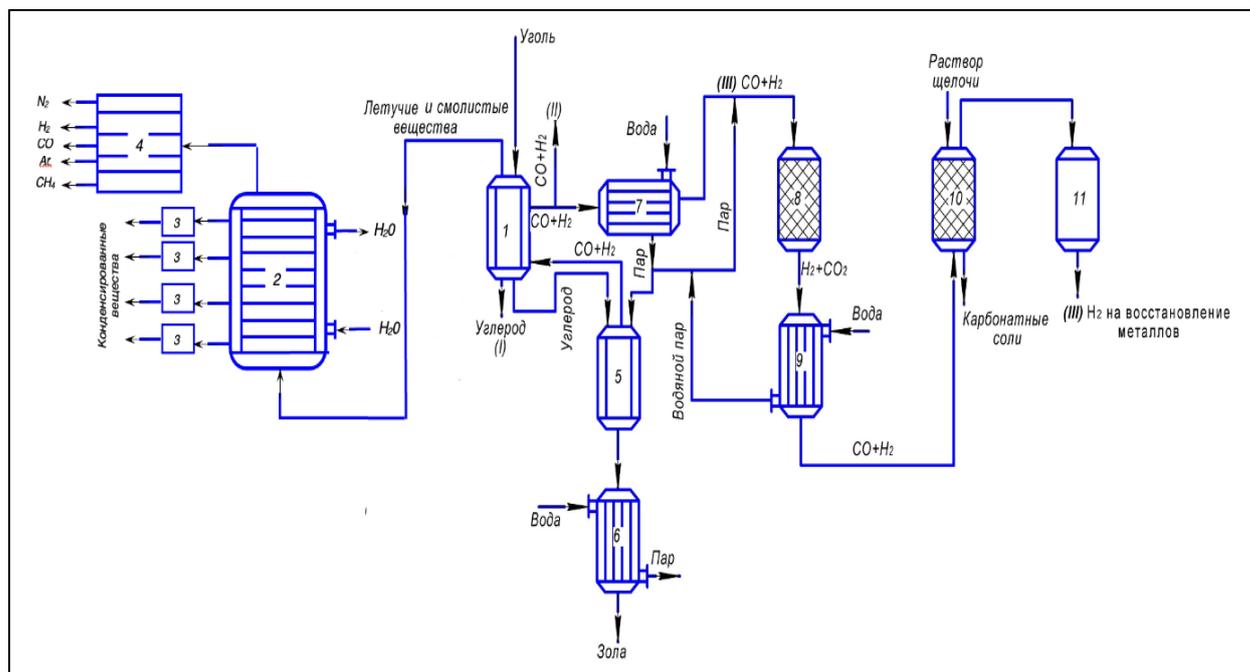
#### **4.1. Многоцелевая технология переработки и газификации угля месторождения Фон-Ягноб**

##### ***4.1.1. Технологическая схема и последовательность процессов переработки угля***

Технологическая схема газификации угля с многофункциональным назначением приведена на рисунке 4.1. Технология представляет последовательность выполнения операций по переработки угля и образованию сопутствующих продуктов.

Уголь во внешнеобогреваемом двухкорпусном реакторе 1 нагревается через внутренний корпус реактора до температуры 680-700 °С, при котором происходит его термолиз с выделением летучих и смолистых веществ и некоторого количества смеси газов. Сначала из состава угля испаряется влага, затем при температуре до 350 °С уголь очищается от летучих и легко выделяемых компонентов, а при повышении температуры до 500-550 °С выделяются смолистые вещества и образуется полукокс, начинается процесс графитизации углерода, образующийся полукокс при температуре 680-700 °С превращается в

чистый углеродистый материал в смеси с неорганическими компонентами состава угля.



**Рисунок 4.1.** - Многофункциональная технологическая схема переработки угля и газификации углерода: 1 - реактор термоллиза угля; 2 –конденсационная колонна с тарелками для охлаждения газообразных летучих и смолистых веществ; 3-сборники конденсированных летучих и смолистых веществ; 4- разделитель газовой смеси, образующейся с летучими и смолистыми веществами; 5 – газогенератор углерода; 6- теплообменник–утилизатор тепла I для охлаждения золы; 7- теплообменник–утилизатор тепла II для охлаждения генераторного газа состава  $\text{CO} + \text{H}_2$ ; 8 – реактор конверсии  $\text{CO}$ ; 9–теплообменник–утилизатор тепла III для охлаждения конвертированного газа состава  $\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ; 10 – щелочной абсорбер  $\text{CO}_2$ ; 11 – конденсатор водяных паров

Выделенные летучие и смолистые вещества, а также газы, выводятся из реактора 1, они поступают снизу в конденсационную колонну 2, охлаждаемую водой. Внутри конденсационной колонны с тарелками 2 выдерживается регулируемый температурный градиент по убывающей зависимости температур конденсации газообразных веществ. Тарелки конденсационной колонны 2

соединены со сборниками конденсированных веществ 3. Конденсация газообразных веществ происходит в обратной зависимости от их температуры испарения из состава угля. Привязанный к составу смеси выделенных веществ температурный градиент режима охлаждения по высоте конденсационной колонны позволяет осуществить полное разделение смеси выделенных веществ на чистые компоненты.

В общем, конденсация и разделение выделенных из состава угля веществ происходит в следующем порядке в интервале температур при: 360 -500 °С - *каменноугольный пек*; 270- 360 °С - *антрацены*; 230- 270 °С - *метилнафталены*; 210-230 °С - *нафталеновая фракция*; 170-200 °С - *фенолы и пиридины*; 90- 170 °С - *бензол и его гомологи*.

Смесь неконденсируемых газов N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> и др. из конденсационной колонны (2) поступает в разделительный узел 4, где разделяют на отдельные составляющие. Разделение газов можно осуществлять известными способами: мембранным с использованием проницаемых мембран применительно к каждому газу [118], или растворами щелочей и иным способом.

Разделённые летучие и смолистые вещества, а также газы будут использованы по назначению в зависимости от их состава. Оставшийся после термолиза (1) пластифицированный углерод может быть использован двумя способами: а) *как восстановительный реагент в металлургических процессах (линия 1)*; б) *подвергнут газификации в газогенераторе (5) с использованием окислителей: кислорода; воздуха; водяного пара или их смеси (линия 11)*.

Выбор окислителя зависит от назначения получаемого генераторного газа и выбранного способа газификации углерода, автотермического с внутренним теплообеспечением или аллотермического с внешним обогревом газогенератора. Газификация углерода в газогенераторе (5) проводится при температуре 950-1000°С или иной, в зависимости от выбранного способа газификации.

После процесса газификации углерода в газогенераторе (5) образующаяся зола направляется в теплообменнике (6) для охлаждения. Охлаждённая зола может

быть использована в производстве цемента и газобетона. Водяной пар или горячая вода, полученные при охлаждении золы, применяются в технологических процессах и для целей теплоснабжения. Генераторный газ, выходящий из газогенератора (5), подаётся в межкорпусное пространство реактора термолиза угля (1), где обеспечивает нагрев угля до температуры 650-700 °С. В зависимости от состава, полученный генераторный газ может быть использован по двум направлениям: а) (линия 11) как газ восстановитель в металлургических производствах; б) (линия 111) для конвертирования CO в CO<sub>2</sub> с целью увеличения количества H<sub>2</sub> в составе генераторного газа эквивалентно количеству конвертируемого CO. Согласно (линии 11) генераторный газ направляется в металлургическое производство, а согласно (линии 111)-для конвертирования CO в CO<sub>2</sub> в котёл-утилизатор тепла (7) для снижения его температуры до пределах температур протекания реакции превращения CO в CO<sub>2</sub>, полученный при этом водяной пар используется в газогенераторе (5) для газификации углерода.

В реакторе (8) на катализаторе осуществляется конверсия CO до CO<sub>2</sub>, далее конвертированный газ охлаждается в котле-утилизаторе тепла (9) и направляется в абсорбционную колонну (10) для выделения CO<sub>2</sub> из его состава растворами щелочей. В конденсаторе-холодильнике (11) из состава генераторного газа выделяются конденсировавшиеся пары воды и газ используется согласно своему составу по назначениям.

Данная технологическая схема позволяет осуществить переработку угля для получения пластифицированного углерода с минеральными компонентами состава угля, газификацию углерода для получения генераторного газа разных составов в зависимости от вещественных и количественных соотношений окислителей к углероду (окислитель: углерод), конвертирование генераторного газа и получение чистого водорода.

Ниже представлены варианты газификации углерода. Для определения параметров процессов переработки угля и получения продуктов использована

проба угля Фон-Ягнобского месторождения с составом, (мас. %): углерод (С) - 81.0; водород (Н) - 5.2; азот (N) - 1.0; кислород (O) - 2.0; сера (S) - 1.4; зола-5.3; влажность - 4.0, содержание летучих веществ 0.98; содержание смолы - 4.5.

#### 4.1.2. Термолиз угля и получение углерода

Процесс термолиза угля в реакторе (1) осуществляется согласно вышеописанному порядку. Полученный в реакторе углерод является многоцелевым сырьём, используемый как вещество восстановитель в металлургических процессах (*линия 1*) и как газифицирующее сырьё для получения генераторного газа. (*линия 11*).

В первом случае, углерод по технологической *линии 1* отправляется в металлургическое производство, где используется как восстановитель металлов согласно реакциям типа



$(Me)_nO_m$  -оксид металла; C- углерод; CO-оксид углерода; CO<sub>2</sub>-диоксид углерода. В таблице 4.1 приведены результаты процесса термолиза 1000 кг угля вышеприведённого состава.

**Таблица 4.1.** - Результаты термолиза 1000 кг угля

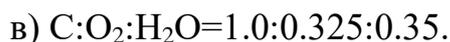
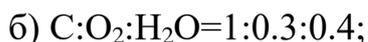
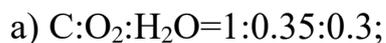
Приход сырья			Выход продуктов термолиза угля		
Вещество	кг	%	Вещество	кг	%
уголь	1000	100	водяной пар	40.0	4.0
			летучие вещества	9.8	0.98
			смолы	45	4.5
			газы	42.2	4.22
			углерод + зола	863.0	86.3
Всего	1000	100	Всего	1000	100

Из данных таблицы 4.1 видно, что при термоллизе угля все вещества его состава выделяются и собираются как полезные продукты, используемые в различных сферах производство материалов.

Из них 863 кг пластифицированного углерода используют в качестве вещество-восстановитель оксидов металлов в пирометаллургии. Результаты применения данного продукта в пирометаллургии приведены ниже.

#### **4.1.3. Газификация углерода**

Полученный углерод с минеральными веществами был газифицирован смесью кислорода с водяным паром при температурах 760-1300 °С при следующих мольных соотношениях окислителей к углероду:



Соотношения окислителей к углероду, представленные выше, можно представить по нижеследующим химическим реакциям, которые протекают авто термическим способом:



В таблице 4.2 приведены результаты газификации пластифицированного углерода. Приведённые данные показывают, что при газификации углерода по всем трём вариантам соотношений количеств окислителей ( $O_2$  и  $H_2O$ ) к углероду в составе генераторного газа содержание  $CO$  остаётся постоянным, тогда как содержание  $H_2$  изменяется. Это объясняется тем, что в образовании  $CO$  участвуют как свободный кислород (реакция 4.1), так и связанный кислород воды (реакция 4.2), протекающие во всех рассмотренных режимах. В то же время образование водорода происходит исключительно за счёт водорода, входящего в состав воды. Следовательно, изменение соотношения  $O_2$  и  $H_2O$  в газифицирующей смеси

оказывает определяющее влияние именно на выход  $H_2$ , не затрагивая концентрацию  $CO$  в генераторном газе.

**Таблица 4.2.** - Результаты газификации углерода

Расход сырья			Приход продуктов газификации		
Вещество	кг	%	Вещество	кг	м <sup>3</sup>
<b>а) С: O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1:0,35:0,3; Температура газификации углерода 1300 °С</b>					
углерод	810,0	40,8	оксид углерода	1890	1512
минеральные вещества	53,0	2,7	водород	40,5	453,6
кислород	756,0	38,1	зола	53,0	-
водяной пар	364,5	18,4	-	-	-
<b>Всего</b>	<b>1983,5</b>	<b>100</b>	<b>Всего</b>	<b>1983,5</b>	<b>1965,6</b>
<b>б) С: O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1:0,3:0,4; Температура газификации углерода 760 °С</b>					
углерод	810,0	40,6	оксид углерода	1890,0	1512
минеральные вещества	53,0	2,7	водород	52,0	604,8
кислород	646,0	32,3	зола	53,0	2,7
водяной пар	486,0	24,4	-	-	-
<b>Всего</b>	<b>1995,0</b>	<b>100</b>	<b>Всего</b>	<b>1995,0</b>	
<b>в) С: O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1:0,325:0,35; Температура газификации углерода 980 °С</b>					
углерод	810,0	40,7	оксид углерода	1890,0	1512
минеральные вещества	53,0	2,7	водород	47,25	529,2
кислород	702,0	35,3	зола	53,0	2,6
водяной пар	425,25	21,3	-	-	-
<b>Всего</b>	<b>1990,25</b>	<b>100</b>	<b>Всего</b>	<b>1990,25</b>	<b>100</b>

Таким образом, количественное соотношение окислителей определяет соотношение окиси углерода ( $CO$ ) и водорода ( $H_2$ ) в составе генераторного газа. При этом, важным является тот факт, что оба компонента  $CO$  и  $H_2$  обладают высокой теплотворной способностью. Поэтому при использовании генераторного газа в качестве энергоносителя или восстановительного агента в металлургичес-

ких процессах они обеспечивают сопоставимый уровень теплового воздействия на протекающие химические реакции, т.е. оба оказывают примерно одинаковое теплообеспечение химическим процессам. Согласно источнику [119], теплотворная способность водорода ( $H_2$ ) составляет  $12770 \text{ кДж/м}^3$ ; а окиси углерода ( $CO$ ) -  $12640 \text{ кДж/м}^3$ . При температурах до  $830 \text{ }^\circ\text{C}$  восстановительная активность  $CO$  превышает активность  $H_2$ , тогда как при температурах выше  $830 \text{ }^\circ\text{C}$  преимущество в восстановительных свойствах переходит к водороду.

В общем, при газификации  $1000 \text{ кг}$  угля вышеуказанного состава Фон-Ягнобского месторождения по всем трём вариантам газификации, кроме летучих и смолистых веществ и золы, количество которых зависят от их содержания в составе угля, образуется генераторный газ, состоящий из  $CO$  в количестве  $1890 \text{ кг}$  и  $H_2$ , в количествах соответственно  $40,5 \text{ кг}$ ;  $47,25 \text{ кг}$  и  $52 \text{ кг}$ , в общем  $1930,5-1942 \text{ кг}$ . Данный состав генераторного газа можно использовать в качестве исходного сырья восстановительного газа в металлургии или в качестве сырья в химической промышленности. Газ используется для синтеза аммиака ( $NH_3$ ), азотной кислоты ( $HNO_3$ ), карбамида ( $CO(NH_2)_2$ ) и других химических соединений. Для увеличения содержания водорода в газе проводится конверсия окиси углерода ( $CO$ ) в диоксид углерода ( $CO_2$ ).

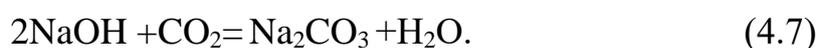
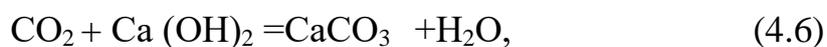
#### ***4.1.4. Процесс конверсии CO, входящего в состав генераторного газа***

Для проведения конверсии  $CO$  было выбрано соотношение  $CO: H_2O=1:1$ , при котором оксид углерода ( $CO$ ), являющийся компонентом генераторного газа, реагирует с эквивалентным количеством водяного пара. В теплообменнике (7) генераторный газ охлаждается до температуры  $320-350 \text{ }^\circ\text{C}$ , после чего поступает в реактор (8), заполненный железным катализатором. Применение железного катализатора обусловлено необходимостью увеличения скорости паровой конверсии оксида углерода ( $CO$ ), протекающая согласно представленной химической реакции:



Согласно данной реакции при конверсии 1890 кг СО состава генераторного газа по таблице 4.1 образуются 2970 кг СО<sub>2</sub> и 135 кг Н<sub>2</sub>. Тогда, с учётом данного количества Н<sub>2</sub> общее количество водорода в составе конвертированного газа составов указанной таблицы возрастает до 175,7 - 187 кг.

Чтобы получить чистый водород из конвертированного газа необходимо выделить СО<sub>2</sub>. Обычно для поглощения СО<sub>2</sub> применяют растворы щелочей, наиболее простым способом является использование щелочей Са (ОН)<sub>2</sub>, NaOH, КОН и другие. Для абсорбционного выделения СО<sub>2</sub> конвертированный газ предварительно охлаждается в котле утилизатора тепла 9 до нормальной температуры. Поглощение СО<sub>2</sub> растворами щелочей протекает по реакциям



Карбонатные соединения выпадают в осадок, а газообразный Н<sub>2</sub> после сушки от паров воды в конденсаторе водяных паров 11 используется в качестве чистого энергоносителя для производства тепла или химического реагента в производствах водородсодержащих химических веществ. Согласно реакциям (4.6) и (4.7) из 2970 кг СО<sub>2</sub> состава генераторного газа образуется 6750 кг СаСО<sub>3</sub> или 7155 кг Na<sub>2</sub>СО<sub>3</sub>. Эти вещества являются широко применяемыми материалами в разных отраслях экономики. СаСО<sub>3</sub> является основным сырьём в производствах цемента, извести, искусственного мрамора и т.п., а кальцинированная сода Na<sub>2</sub>СО<sub>3</sub> имеет широкое применение в химической промышленности. Образующийся как побочный продукт зола угля также является ценным сырьём, особенно для применения в качестве минеральной добавки к гипсовым и цементным вяжущим для повышения прочности строительных изделий из них [120]. Таким образом, можно заключить, что разработанная технология газификация угля, основанная на предварительный термолиз угля и получения пластифицированного углерода с его газификацией позволяет осуществить эффективную переработку угля для получения полезных продуктов из компонентов его состава. Данная технология не имеет выбросов газов в атмосферу или твердых отходов, в основном

осуществляется за счёт тепла реакций, протекающих на разных стадиях производства переработки угля, и является энергосберегающая.

## **4.2. Восстановление свинцово-цинкового концентрата водородом, полученного газификацией угля Фон-Ягнобского месторождения**

### ***4.2.1. Получение водорода из угля***

В Таджикистане сравнительно быстро развивается горнорудная отрасль по добычи и переработки минерального сырья, имеющего сложный минералогический состав.

В Таджикистане сравнительно быстро развивается горнорудная отрасль по добычи и переработки минерального сырья, имеющего сложный минералогический состав. К числу такого сырья можно отнести свинцово-цинковой руды месторождения Кони Мансур [121-123]. Концентрат данной руды, получаемый на ГОК «Адрасман», является полиметаллическим. Применение эффективных и безотходных технологий комплексной переработки данного полиметаллического концентрата в отдельные продукты вносить свой вклад в развитии горнорудной отрасли промышленности страны.

Известны способы получения металлов из свинцово-цинковых концентратов по технологии кислород–взвешенной циклонной электротермической плавки (КИВЦЕТ) [124] и плавки в жидкой ванне (ПЖВ) [125]. Также известны способы непосредственного получения черного свинца с помощью применения различных веществ восстановителей металлов: твердого углерода, оксида углерода, карбида кальция, водорода, природного газа и других видов топлива [126-128]. В работах [129,130] представлены основные теоретические положения, касающиеся применения восстановительных газов для извлечения металлов из рудного и другого сырья. В этих работах рассмотрены различные методы восстановления металлов с использованием реакторов. Более применимы реакторы с кипящим слоем и установки для пылевидного обжига. Встречаются также шахтные и вращающиеся печи. Использование восстановительных агентов, таких

как природный газ, оксид углерода и водород, для извлечения металлов из минеральной части концентратов является эффективным подходом к переработке свинцово-цинковых концентратов.

Этот подход отличается меньшим числом технологических стадий и обеспечивает более высокий выход металла из его сульфатной формы. Согласно данным [131], для получения 1 кг водорода из природного газа требуется 35 мДж/кг тепловой энергии, тогда как из угля - 67,5 мДж/кг. В то же время электролиз воды требует 570 мДж/кг, что в 8,5 и 16,3 раза превышает затраты по сравнению с использованием углеродсодержащего сырья. Учитывая отсутствие добычи природного газа в Таджикистане, альтернативным источником водорода может служить его производство из угля.

Технологическая схема получения газов из угля с целью получения водорода для восстановления металлов представлена на рисунке 4.2 [132, 133]. Образование пластифицированного углерода в реакторе 1 сопровождается выделением летучих и смолистых компонентов, улавливаемые в колонне 2 с процессом их конденсации. Данный процесс реализуется в соответствии с технологической схемой (рис. 4.1).

В газогенераторе 3 осуществляется газификация углерода водяным паром при мольном соотношении  $C: H_2O=1:1$  по реакции (4.4), в результате чего образуется генераторный газ с эквимолекулярным содержанием  $CO$  и  $H_2$  (1:1). Далее, в реакторе 6 проводится процесс конверсии оксида углерода по реакции (4.5), также при соотношении  $CO: H_2O = 1:1$ . Необходимо подчеркнуть, что реакция (4.4) является эндотермической и поэтому поддерживается процесс газификации углерода в диапазоне 1000-1100 °С. Газогенератор дополнительно нагревается через внутренний корпус с использованием электрической энергии или других безотходных методов энергообеспечения.

Оксид углерода ( $CO$ ) и водород ( $H_2$ ) относятся к числу наиболее активных восстановителей, широко используемых в процессах восстановительной металлургии и химической технологии. Оба компонента способны эффективно взаимодействовать с оксидами металлов, восстанавливая их до металлического состояния и образуя стабильные газообразные продукты -  $CO_2$  и  $H_2O$ .



использованием разработанной технологии получения водорода. Процессы газификации конверсии были проведены при мольных соотношениях  $C: H_2O=1:1$  и  $CO: H_2O=1$ , что обеспечивает эффективное протекание реакций паровой конверсии углерода и оксида углерода. В результате образуется генераторный газ с повышенным содержанием водорода, который может быть использован в металлургической промышленности и химических процессах, где необходим высокоактивный восстановитель.

**Таблица 4.3.** – Материальные потоки, участвующие в процессах газификации углерода и преобразования оксида углерода

Приход сырья			Выход продуктов		
Вещество	кг	%	Вещество	кг	%
<b>Газификация углерода водяным паром</b>					
углерод	810	39,3	оксид углерода	1890	93,3
водяной пар	1215	60,7	водород	135	6,7
Всего	2025	100	Всего	2025	100
<b>Конверсия оксида углерода водяным паром</b>					
оксид углерода	1890	58,3	диоксид углерода	2970	91,7
водяной пар	1215	37,5	водород	270	8,3
водород	135	4,2	-	-	-
Всего	3240	100	Всего	3240	100

#### **4.2.2. Характеристика свинцово-цинковой руды Кони Мансур**

Согласно проведенным исследованиям в работе [134], свинец (Pb) в первичных рудах месторождения Кони Мансур преимущественно локализуется в виде минерала галенита (PbS), который является его основным носителем. Установлено, что минерал галенит имеет несколько генераций, и представляет сложную и многостадийную минерализацию. На Кони Мансурском месторождении на верхних горизонтах рудного тела, галенит как правило присутствует в виде ксеноморфных (аноморфных) зерен размером от 5 до 50 мкм. Эти зёрна, как правило, проявляют тесное пространственное и текстурное

взаиморасположение с рядом других сульфидных и сульфосолевых минералов. В частности, галенит сростается со сфалеритом ( $ZnS$ ), тремейеритом ( $AgCuTeO_4$ ), пиритом ( $FeS_2$ ), флюоритом ( $CaF_2$ ), а также с так называемой «блеклой рудой», представленной сложными медно-сурьмяными и медно-мышьяковыми сульфосолями ( $Cu_{12}SbS$ ,  $Cu_{12}As_4S_{13}$ ). Такое минералогическое сопровождение свидетельствует о полиметаллическом характере рудоносной системы и ее формировании в условиях изменения параметров флюидного режима. На более глубоких уровнях месторождения Кони Мансур морфология и распределение галенита существенно изменяется. Здесь он заполняет интерстициальные пустоты в сульфидных агрегатах, состоящих преимущественно из сульфосолей висмута пирита, гематита, халькопирита. Размеры зёрен галенита в этих горизонтах увеличиваются, достигая 30-50 мкм, что может отражать более стабильные физико-химические условия кристаллизации и меньшую степень разрушения минеральных по сравнению с поверхностными зонами. Химический состав галенита в исследованных пробах отличался высокой степенью чистоты и соответствовал практически теоретическим значениям для  $PbS$ . По результатам микрозондового анализа, содержание свинца достигается 86,60 мас. %, а серы -13,40 мас. %, что подтверждает его близость к идеальной формуле минерала. Отсутствие значимых примесей может быть связано с низкой способностью к изоморфному замещению в условиях, при которых формировались данные руды. Сера изоморфно замещается Se, существует непрерывный изоморфный ряд галенит  $PbS$  — клаусталит  $PbSe$ , различные представители которого имеются в природе.  $PbS$  часто содержит примесь Ag, обычно до 0,1 %, реже 0,5—1 % и выше, что обусловлено наличием включений сульфидов серебра или присутствием  $AgBiS_2$  в твердом растворе. Анализы показывают также наличие Zn, Cd, Sb, Bi, Cu, Sn, In, Tl, Au, Pt и других (обычно не более десятых долей процента) в руде, в большинстве случаев это связано с наличием примесей других минералов: сфалерита, буланжерита, халькопирита и других. Свинец в составе галенитов является смесью изотопов  $Pb^{204}$ ,  $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$  и  $Pb^{208}$ . Последние три изотопа в земной коре непрерывно

накапливаются за счет радиоактивного распада U и Th. Изотопный состав свинца PbS может быть использован для определения абсолютного возраста руды.

В первичных рудах месторождения Кони Мансур основным минералом, содержащим цинк, является сфалерит (ZnS). Цинксодержащие блёклые руды играют второстепенную роль, которые в своем составе цинк достигает до 7,75 %. В верхних горизонтах вкраплённых руд сфалерит формирует зёрна и прожилки толщиной 0,05-0,1 мм. Минерал характеризуется низким содержанием железа (до 1,35 % Fe), а также содержит кадмий в пределах от 0,19 до 1,74 %.

Нижеследующая проба с минералогическим составом концентрата Кони Мансурского месторождения использована для исследований (мас. %): PbS – 46,0; ZnS – 5,10; CuFeS<sub>2</sub> – 5,04; FeS<sub>2</sub> – 34,64; SiO<sub>2</sub> – 7,12; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,10.

### **4.3. Процессы восстановления сульфидов металлов при участии водорода**

Процессы восстановления свинца и цинка из их сульфидов с использованием водорода в качестве восстановителя можно записать в виде следующих химических уравнений:



В работе [135] термодинамическим способом обоснована и экспериментально показана возможность восстановления сульфидов свинца, цинка, железа и меди водородом и природным газом при температурах 900–1300 °С. Экспериментальные исследования по восстановлению металлов из их чистых сульфидов водородом, проведённые при указанных температурах, показали, что с повышением температуры и времени переработки концентрата степень восстановления металлов возрастает. При этом, свинец полностью восстанавливается при температуре 1300 °С уже через 40 минут переработки сульфида свинца, однако при данных условиях степень восстановления цинка, железа и меди из их сульфидов составляет соответственно 47,12 %, 19,57 % и 5,35

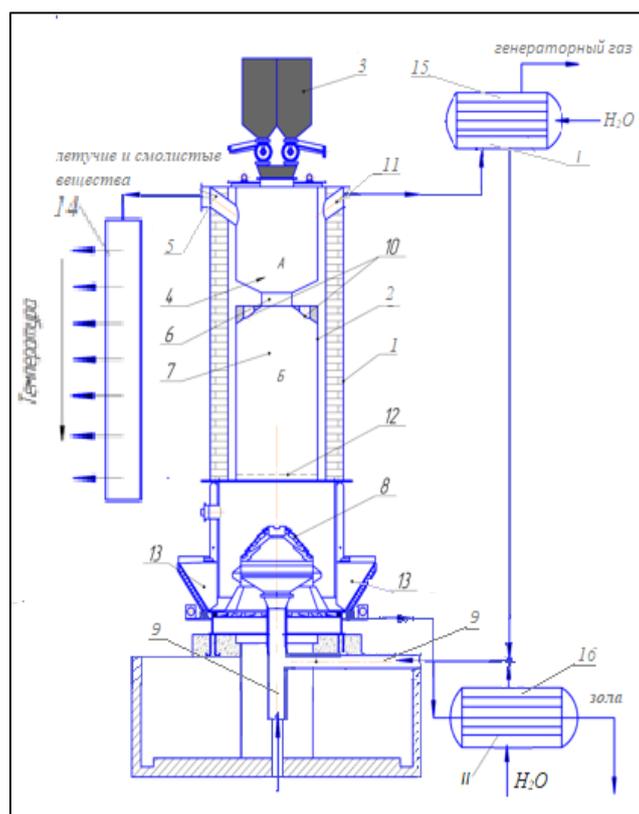
% . Следовательно, для полного восстановления цинка, железа и меди потребуется более длительная переработка концентрата при высоких температурах, чем 1300 °С. Согласно исследованиям работы [135], значения константы скорости реакции восстановления свинца (4.8) при температурах 900-1300 °С варьируется в пределах  $1.585 \cdot 10^{-2} \dots 9.772 \cdot 10^{-2}$ , в тоже время значения константы скорости реакции восстановления цинка по реакции (4.9) на порядок ниже, а для реакции восстановления железа и меди соответственно на полтора - два порядка меньше, чем значения константы скорости восстановления свинца. При указанных температурах свинец полностью восстанавливается, но цинк возгоняется в газообразное состояние, а железо и медь остаются в штейне. Вышеприведённые результаты экспериментальных работ могут быть основанием для переработки полиметаллических сульфидных концентратов, в том числе и свинцово-цинкового концентрата Кони Мансур, водородом, полученным из угля предложенным способом с тем, чтобы селективно разделить металлы состава концентрата и выделить свинец в черновой металл, цинка- в возгоны, а железо и медь в штейне.

Стехиометрические расчёты показывают, что для восстановления одного кМоль свинца из PbS (масса 239,28 кг) требуется всего 2 кг водорода. Согласно данным Таблицы 6, из 1000 кг угля по прилагаемой технологии можно получить 270 кг водорода. Этого объема водорода достаточно для восстановления 135 кМоль PbS (32,3 т), что соответствует получению 27972 кг металлического свинца. Таким образом, предложенный метод производства водорода обеспечивает его количество, достаточное для реализации полного процесса восстановления свинца из сульфидов в масштабах промышленного производства.

#### **4.4. Конструкция двухступенчатого газогенератора и её описание**

Для оптимального осуществления процесса переработки угля и газификации углерода разработана конструкция двухступенчатого совмещённого реактора-газогенератора [136], состоящего из секции А и Б (рис. 4.3).

Уголь подаётся через загрузочный штуцер 3 в камеру 4 реактора А для его нагревания до температуры 700 °С. В результате происходит пластификация



**Рисунок 4.3.** – Экспериментальный двухступенчатый газогенератор угля: А-верхняя ступень газогенератора: реактор нагрева угля; Б-нижняя ступень газогенератора: газогенератор углерода; 1-внешний футерованный корпус реактора; 2-внутренний стальной корпус реактора; 3-загрузочное устройство для подачи угля в реактор; 4-камера реактора нагрева угля и получения пластифицированного углерода; 5-штуцер для отвода газообразных летучих и смолистых компонентов состава угля; 6- устройство для подачи углерода из реактора нагрева угля в газогенератор; 7-камера газогенератора для газификации углерода; 8-вращающаяся колосниковая решетка для распределения газообразного окислителя в объёме зоны газификации углерода; 9- входной штуцер для подачи веществ окислителей в реактор; 10- сетчатая часть стенки внутреннего корпуса реактора для прохождения генераторного газа из зоны реакции в межкорпусное пространство реактора; 11- выходной штуцер для отвода генераторного газа из реактора в котёл- утилизатор тепла; 12 - решетка для улавливания непрореагировавших частиц углерода; 13-выходное устройство для выгрузки золы из реактора; 14-конденсационная колонна для охлаждения летучих и смолистых веществ и их превращения из газообразного в жидкое состояние;15-котёл-утилизатор тепла для охлаждения генераторного газа и получения водяного пара; 16-котёл-утилизатор тепла для охлаждения золы и получения водяного пара

углерода с одновременным выделением летучих и смолистых веществ. В секции Б реактора осуществляется процесс газификации углерода с образованием генераторного газа. Конструкция реактора-газогенератора представляет собой двухслойный корпус. Генераторный газ, образующийся в секции Б, через сетчатое отверстие 10 поступает в межкорпусное пространство, где используется для подогрева угля, поступающего в секцию А, способствуя выделению летучих и смолистых компонентов и образованию пластифицированного углерода. Выделившиеся летучие и смолистые вещества в газообразной форме отводятся через штуцер 5 и направляются в конденсационную колонну 14. Там происходит процесс охлаждения, где в зависимости от температур конденсации отдельных компонентов собираются в отдельные сосуды для последующего использования.

Секции А и Б соединены устройством 6, через которого углерод с минеральными веществами состава угля из камеры 4 реактора нагрева угля (секция А) подаётся в камеру газификации 7 газогенератора (секция Б).

Горячий генераторный газ через сетчатые отверстия 10 из секции газогенератора Б поступает в межкорпусное пространство и после нагрева угля в секции А через выходной штуцер 11 отводится в котёл-утилизатор тепла 15 для охлаждения и дальнейшего использования согласно его составу. Также через выходного штуцера 13 зола угля выводится в котёл-утилизатор тепла 16 для охлаждения и дальнейшего использования. Образовавшийся водяной пар в котлах-утилизаторах тепла 15 и 16 совмещается в один поток и через входной штуцер 9 и подаётся в газогенератор Б снизу навстречу поступающего с реактора А углерода. Штуцер 9 имеет два входа для подачи веществ - окислителей углерода, по второму входу в зону газификации подаётся воздух или кислород при осуществлении паровоздушной или парокислородной газификации углерода. Штуцер 9 соединён с расположенной снизу газогенератора Б колосниковой решеткой 8, которая, вращаясь равномерно распределяет веществ-окислителей углерода по всему объёму газифицирующего углерода. Между газогенератором и колосниковой решётки 8 расположена защитная решётка 12 для улавливания частиц непрореагировавшего углерода.

Преимуществом разработанной конструкции газогенератора является его высокая компактность, благодаря которой процессы нагрева угля с целью получения пластифицированного углерода и последующей газификации углерода объединены в одном реакционном объеме. Такой подход позволяет эффективно использовать тепло горячего генераторного газа, который не только обеспечивает нагрев угля, но и используется для генерации водяного пара, необходимого для реакции газификации. Дополнительно, тепловая энергия горячей воды, образующейся в процессе, также направляется на выработку пара, что еще больше повышает энергетическую отдачу системы.

Компактность представленной конструкции минимизирует тепловые потери установки, так как все процессы газификации угля происходят в тесно связанных зонах одного устройства, без необходимости применения длинных теплопроводящих линий и дополнительной изоляции. Это способствует максимально эффективному использованию внутренней тепловой энергии и значительно повышает общую энергоэффективность установки, снижая потребность в дополнительных внешних источниках тепла. Благодаря интеграции функций нагрева и газификации в одном корпусе, существенно снижается материалоемкость оборудования, уменьшаются объемы применяемых конструкционных материалов, сокращаются трудозатраты на изготовление и сборку. В свою очередь, это приводит к снижению капитальных и эксплуатационных затрат на реализацию технологического процесса газификации угля. Унифицированность конструкции газогенератора требует значительно меньше производственной площади для его установки, по сравнению с традиционными схемами, где используются отдельные установки для каждого этапа производства продукта. При модернизации существующих производств использования углей, также не маловажным фактором является его размещение. Компактная конструкция газогенератора не только упрощает общую компоновку оборудования на промплощадке, но и снижает затраты на строительные работы, монтаж и обслуживание. Повышение промышленной безопасности

представленной конструкции газогенератора обеспечивается удобством при эксплуатации и облегченному доступу к узлам обслуживания.

#### 4.5. Заключение по результатам четвертой главы

На основе данных, полученных в ходе термолиза угля, были разработаны комплексные технологические схемы его газификации, ориентированные на эффективное расщепление угольной массы на отдельные компоненты с последующим целенаправленным преобразованием этих фракций в востребованные химические соединения и энергоносители. В рамках предложенной технологии осуществляются поэтапное выделение: летучих соединений и смолистых веществ, пластифицированного углеродного остатка, обогащенного минеральными примесями, которые в процессе окончательного газификации высвобождаются в виде золы.

Полученный твёрдый остаток в виде пластифицированного углерода, прошедший процесс термолиза, характеризуется высокой реакционной способностью и является оптимальным сырьём для газификации с целью получения генераторного газа, используемого как в энергетическом, так и в технологическом применении. Процесс газификации углерода осуществляется в присутствии окислителя, преимущественно водяного пара, который вводится в реактор в эквимолярном соотношении с углеродом  $H_2O:C = 1:1$ . В результате на каждый моль углерода образуется 1 моль  $CO$  и 1 моль  $H_2$ , то есть соотношение компонентов в полученном газе составляет  $CO:H_2=1:1$ . При подачи дополнительного количества водяного пара и проведении реакции паровой конверсии окиси углерода получают двуокись углерода ( $CO_2$ ). После полной конверсии окиси углерода количество водорода в составе газа увеличивается в два раза, по сравнению с первоначальным содержанием. Это делает процесс высокоэффективным в производстве водородсодержащего газа с повышенной теплотворной способностью. Полученный в процессе газификации водород представляет собой многофункциональный продукт с широким спектром применения как в химической, так и в энергетической и металлургической

отраслях: водород ( $H_2$ ) целесообразно применять в качестве реагента при получении водородсодержащих соединений. Он широко применим в процессе получения аммиака ( $NH_3$ ) посредством процесса Габера-Боша ключевого этапа промышленного производства азотных удобрений. Кроме того, водород служит исходным реагентом при синтезе метанола ( $CH_3OH$ ), который является важным химическим сырьём и потенциальным топливом, обеспечивая возможность интеграции в энергетические и химические производственные схемы. Водород широко применим в производстве карбамида ( $CO(NH_2)_2$ ), необходимого для агропромышленного использования. Использование водорода для металлургической отрасли, как эффективный восстановитель, заменяя традиционные углеродсодержащие восстановители (кокс и природный газ), снижает выбросы диоксида углерода ( $CO_2$ ) и обеспечивает осуществление экологически чистых металлургических процессов. Водород, как высокоэффективный и экологически безопасный энергоноситель, обладающий высокой удельной теплотой сгорания (120-144 мДж/кг) и при сгорании образующий только в водяной пар, не создаёт образование парниковых газов и загрязняющих веществ.

Водород также используется в топливных элементах, преобразующих химическую энергию непосредственно в электрическую с высоким КПД (до 60 % и выше), что очень важно для автономных и маломасштабных систем энергоснабжения, мобильных энергоустановок, беспилотных аппаратов и транспорта на водородной тяге. Водород применяется также в традиционных тепловых установках, как промышленные котлы, турбины и теплогенераторы.

Для реализации комплексной и малозатратной технологии получения и применения водорода была разработана двухступенчатая конструкция газогенератора, обеспечивающая на первой ступени проведение термолиза угля с получением летучих и смолистых веществ с образованием пластифицированного углерода и на второй ступени газификацию пластифицированного углерода с получением генераторного газа с большим содержанием высокотеплотворных газов  $H_2$  и  $CO$ , широко используемых в различных отраслях экономики.

Использование двухступенчатого реактора-газогенератора угля в промышленном производстве водорода позволяет гибко управлять параметры технологических процессов для оптимизации составов генераторного газа, повысить энергоэффективность производства и минимизировать вредные выбросы, что делает предложенную технологию газификации угля перспективной и устойчивой для развития водородной энергетики разных отраслях экономики Таджикистана.

## ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 5.1. Рациональное и экологически безопасное использование топливно-энергетических ресурсов в отрасли

Переход к устойчивому энергетическому развитию является одной из приоритетных задач современного общества. В этом контексте особое значение приобретают вопросы рационального и экологически безопасного использования топливно-энергетических ресурсов. Полученные в ходе проведенного исследования результаты направлены на решение актуальной для Республики Таджикистан проблемы повышения эффективности и экологической безопасности использования местных угольных ресурсов, в частности угля Фон Ягнобского месторождения.

#### 1. *Экономическая и энергетическая значимость исследования*

В современных макроэкономических условиях Таджикистана, когда доля топливно-энергетических затрат в себестоимости промышленной продукции превышает 20 %, развитие технологий комплексной переработки угля приобретает стратегическое значение. Результаты исследования подтверждают, что замещение импортируемых энергоносителей: нефти и природного газа местным углём возможно при условии внедрения новых технологических решений, обеспечивающих экологическую безопасность и экономическую эффективность.

Проведенный анализ показал, что комплексное использование угля Фон Ягнобского месторождения, является перспективным направлением развития энергетической, химико-металлургической, строительной отраслей. Таким образом, внедрение разработанных технологий переработки угля может стать инструментом укрепления энергетической независимости страны и повышения устойчивости её промышленного сектора.

#### 2. *Термолиз и физико-химические характеристики угля*

Результаты экспериментов по термолизу угля, проведенных как в трубчатой печи, так и гравиметрическим методом, показали, что, при температурах 600 – 700

°С из угля выделяются летучие вещества и смолистые вещества, а основная масса углерода подвергается пластификации.

Обнаружено, что окисление пластифицированного углерода кислородом происходит по механизму образования промежуточного соединения  $C_2O_4$ , которое далее разлагается до  $CO_2$ . Кинетический анализ показал, что процесс окисления углерода подчиняется уравнению первого порядка, что согласуется с литературными данными и подтверждает достоверность полученных результатов.

### *3. Энергетический потенциал угля и оценка его пригодности к газификации*

В ходе исследования определена зависимость теплоты сгорания летучих веществ ( $Q$ , МДж/кг) от топливного коэффициента, что позволило количественно оценить энергетический потенциал угля. Установлено, что исследуемый уголь характеризуется высоким содержанием летучих веществ и достаточной теплотворной способностью, что делает его перспективным сырьём для процессов газификации и получения генераторного газа.

Эти результаты имеют важное значение для выбора оптимальных технологических параметров при проектировании промышленных установок по переработке угля и для сравнительной оценки топлив из различных месторождений страны.

### *4. Экологическое и технологические аспекты исследования*

Использование предложенной технологии газификации угля обеспечивает существенное снижение вредных выбросов в атмосферу за счет глубокой переработки угля и поэтапного выделения компонентов. Полученный твердый остаток в виде реакционноспособного пластифицированного углерода может быть использован для получения чистого генераторного газа, а также в качестве исходного материала для получения высокодисперсного углерода и других ценных продуктов. Таким образом, разработанная схема переработки угля позволяет минимизировать образование отходов и повысить степень утилизации минеральной части угля, что соответствует принципам «чистой» энергетики и международным требованиям по сокращению выбросов парниковых газов.

## 5.2. Разработка и обоснование комплексной технологии газификации угля Фон-Ягнобского месторождения

На основе данных термолиза была предложена двухступенчатая комплексная технология переработки угля, включающая:

- а) первую ступень - термолиз, обеспечивающий выделение летучих и смолистых веществ и получение пластифицированного углерода;
- б) вторую ступень – газификацию полученного углерода с использованием водяного пара и кислорода, а также проведение паровой конверсии окиси углерода.

В ходе газификации углерода при соотношении  $H_2O: C = 1:1$  получен генераторный газ с соотношением компонентов  $CO: H_2 = 1:1$ . При последующей паровой конверсии  $CO$  в  $CO_2$  содержание водорода в газе увеличивается в два раза. Это свидетельствует о высокой эффективности процесса получения водородсодержащего газа с повышенной теплотворной способностью.

При термолизе угля все вещества его состава выделяются и собираются как полезные продукты, используемые в различных сферах производство материалов.

Конденсация и разделение выделенных из состава угля веществ происходит в следующем порядке в интервале температур при:  $360-500\text{ }^\circ\text{C}$  - каменноугольный пек;  $270-360\text{ }^\circ\text{C}$  - антрацены;  $230-270\text{ }^\circ\text{C}$  - метилнафталены;  $210-230\text{ }^\circ\text{C}$  - нафталиновая фракция;  $170-200\text{ }^\circ\text{C}$  - фенолы и пиридины;  $90-170\text{ }^\circ\text{C}$  - бензол и его гомологи. Смесь неконденсируемых газов  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$  и др. из конденсационной колонны разделяют на отдельные составляющие. Разделение газов можно осуществлять известными способами: мембранным с использованием проницаемых мембран применительно к каждому газу или растворами щелочей. Разделённые летучие и смолистые вещества, а также газы будут использованы по назначению в зависимости от их состава.

Оставшийся после термолиза пластифицированный углерод может быть использован двумя способами: а) как восстановительный реагент в металлургических процессах; б) подвергнут газификации в газогенераторе с использованием окислителей: кислорода; воздуха; водяного пара или их смеси. Выбор окислителя зависит от назначения получаемого генераторного газа и

выбранного способа газификации углерода, автотермического с внутренним теплообеспечением или аллотермического с внешним обогревом газогенератора. Количественное соотношение окислителей определяет соотношение окиси углерода (CO) и водорода (H<sub>2</sub>) в составе генераторного газа. При этом, важным является тот факт, что оба компонента CO и H<sub>2</sub> обладают высокой теплотворной способностью. Поэтому при использовании генераторного газа в качестве энергоносителя или восстановительного агента в металлургических процессах они обеспечивают сопоставимый уровень теплового воздействия на протекающие химические реакции, т.е. оба оказывают примерно одинаковое теплообеспечение химическим процессам. Теплотворная способность водорода (H<sub>2</sub>) составляет 12770 кДж/м<sup>3</sup>; а окиси углерода (CO) -12640 кДж/м<sup>3</sup>. При температурах до 830 °С восстановительная активность CO превышает активность H<sub>2</sub>, тогда как при температурах выше 830 °С преимущество в восстановительных свойствах переходит к водороду.

Газификация углерода в газогенераторе проводится при температуре 950-1000°С, в зависимости от выбранного способа газификации. После процесса газификации углерода в газогенераторе образующаяся зола охлаждается и может быть использована в производстве цемента и газобетона. Водяной пар или горячая вода, полученные при охлаждении золы, применяются в технологических процессах и для целей теплоснабжения.

В реакторе на катализаторе осуществляется конверсия CO до CO<sub>2</sub>, который широко используют в технологии получения минеральных удобрений.

Полученный водород можно использовать для полного восстановления цинка, железа и меди при переработке руд и концентратов. Значения константы скорости реакции восстановления свинца при температурах 900-1300 °С варьируется в пределах  $1.585 \cdot 10^{-2} \dots 9.772 \cdot 10^{-2}$ , в тоже время значения константы скорости реакции восстановления цинка на порядок ниже, а для реакции восстановления железа и меди соответственно на полтора - два порядка меньше, чем значения константы скорости восстановления свинца. При указанных температурах свинец полностью восстанавливается, но цинк возгоняется в

газообразное состояние, а железо и медь остаются в штейне. Вышеприведённые результаты экспериментальных работ могут быть основанием для переработки полиметаллических сульфидных концентратов, в том числе и свинцово-цинкового концентрата Кони Мансур, водородом, полученным из угля предложенным способом с тем, чтобы селективно разделить металлы состава концентрата и выделить свинец в черновой металл, цинка- в возгоны, а железо и меди- в штейне.

*Разработка двухступенчатой конструкции газогенератора.* Для реализации комплексной технологии переработки угля была разработана двухступенчатая конструкция газогенератора, обеспечивающая на первой ступени проведение процесса термолиза угля с получением летучих и смолистых веществ с образованием пластифицированного углерода. На второй ступени газификацию пластифицированного углерода с подачей водяного пара и кислорода, а также проведение последующих этапов конверсии газа и выделение водорода.

Компактность представленной конструкции минимизирует тепловые потери установки, так как все процессы газификации угля происходят в тесно связанных зонах одного устройства, без необходимости применения длинных теплопроводящих линий и дополнительной изоляции. Это способствует максимально эффективному использованию внутренней тепловой энергии и значительно повышает общую энергоэффективность установки, снижая потребность в дополнительных внешних источниках тепла. Благодаря интеграции функций нагрева и газификации в одном корпусе, существенно снижается материалоемкость оборудования, уменьшаются объемы применяемых конструкционных материалов, сокращаются трудозатраты на изготовление и сборку, которое приводит к снижению капитальных и эксплуатационных затрат на реализацию технологического процесса газификации угля. Унифицированность конструкции газогенератора требует значительно меньше производственной площади для его установки, по сравнению с традиционными схемами, где используются отдельные установки для каждого этапа производства продукта. При модернизации существующих производств использования углей, также не маловажным фактором является его размещение.

## Выводы

1. Проведено исследование состава и свойств угля Фон-Ягнобского месторождения, осуществлён термолиз угля для выделения летучих и смолистых веществ его состава и получения пластифицированного углерода, проведена газификация углерода состава угля для получения энергетического и технологического газов [4-А, 5-А, 8-А, 11-А, 12-А, 13-А, 15-А].
2. При осуществление термолиза угля до температурах 650-700 °С выделены летучие и смолистые вещества состава угля при следующих температурах: пары воды и неконденсируемые газы при 90-100 °С; бензол и его гомологи при 110-170 °С; фенолы и пиридины при 170-200 °С; нафталиновая фракция при 210-230 °С; метилнафталены при 230-270 °С; антрацены при 270-360 °С; каменноугольный пек при 360-500 °С. Предложен способ конденсации летучих и смолистых веществ согласно градиенту уменьшения температуры для отдельного получения каждого вещества в жидком виде [3-А, 7-А, 6-А, 15-А, 18-А, 19-А, 20-А].
3. Термогравиметрическое исследование угля показало, что в окислительной среде выход летучих веществ начинается при более низких температурах, чем в инертной среде аргона. Пик убыли массы пробы угля приходится в интервале температур 420-440 °С. Интенсивность выхода летучих веществ возрастает с ростом скорости нагрева угля. В инертной среде аргона выход летучих веществ продолжается на протяжении всего процесса нагрева пробы, но в окислительной среде выгорание угля завершается при температуре 600°С [3-А, 5-А, 7-А, 8-А, 19-А, 20-А].
4. Исследовано, что при температурах 650-700 °С углерод совместно с минеральными веществами состава угля пластифицируется, пластифицированный углерод является эффективным сырьём для использования в качестве реагента для восстановления металлов в металлургии или газификации кислородом и водяным паром для получения энергетического и технологического газов [4-А, 5-А, 8-А, 10-А, 11-А, 18-А, 19-А, 20-А].
5. Исследована кинетика окисления углерода кислородом. Выявлено, что процесс взаимодействия углерода с кислородом протекает как гетерогенная реакция с первоначальным образованием поверхностного оксида  $C_2O_4$  с последующим его

разложением на CO и CO<sub>2</sub>. Энергия активации образования и разложения поверхностного оксида соответственно  $E_1 = 180$  кДж/моль и  $E_2 = 197$  кДж/моль [1-А, 2-А, 5-А, 4-А, 7-А, 13-А, 14-А].

6. Разработана рациональная технология газификации угля, выражающаяся в том, что до газификации термоллизом угля при его нагревании до температур 700 °С из его состава выделяются летучие и смолистые компоненты, которые затем конденсируются и могут быть использованы в соответствии с их химическим составом, а оставшийся углерод используется как восстановитель металлов или газифицируется кислородом и водяным паром для получения генераторного газа, состоящего из водорода и оксида углерода, которые используются как восстановитель металлов или подвергаются конверсии оксида углерода водяным паром с последующим абсорбционным выделением диоксида углерода и получением чистого водорода [1-А, 2-А, 6-А, 7-А, 11-А, 12-А, 13-А, 18-А, 20-А].

7. Полученный газификацией угля Фон-Ягнобского месторождения водород был использован для восстановления металлов из свинцово-цинкового концентрата руды месторождения Кони Мансур. Установлено, что при газификации 1000 кг угля с использованием технологии, разработанной в рамках данного исследования, образуется 270 кг H<sub>2</sub>, что может восстанавливать 27,972 кг свинца Pb из 32,3 т минерала галенита PbS [1-А, 4-А, 6-А, 9-А, 14-А, 17-А].

8. Разработана конструкция двухступенчатого газогенератора угля, в которой тепловой реактор для получения углерода и блок газификации углерода объединены в едином устройстве. Такое совмещенное решение позволяет в одном агрегате последовательно осуществлять термическую переработку угля с выделением углерода, летучих и смолистых веществ, последующую газификацию углерода и получение генераторного газа и золы, использовать тепло горячего генераторного газа и золу угля для получения водяного пара, используемого для газификации углерода. Двухступенчатый газогенератор компактный с меньшей материальной затратой и энергопотребностью, не имеет выбросов, загрязняющих окружающую среду [5-А, 18-А, 19-А, 20-А].

## **Рекомендации по практическому использованию результатов исследования**

Результаты проведенного исследования имеют значительную практическую потребность для внедрения в промышленные процессы углепользования и энергетики с целью повышения эффективности и экологической безопасности переработки угля. Основные направления практического применения данных результатов включают следующее:

### *1. Разработка промышленной многофункциональной технологии переработки угля месторождений Таджикистана*

Разработанная технология позволяет осуществлять глубокую комплексную переработку угля с получением широкого спектра ценных продуктов:

- высокочистого твердого углерода, пригодного для применения в металлургии, электротехнической и химической промышленности;

- генераторного газа, обладающего энергетическим и технологическим потенциалом;

- летучих и смолистых веществ, включающих антрацены, метил нафталины, нафталиновая кислота, фенолы и пиридины, бензол и его гомологи, представляющие интерес как сырьё для химической и нефтехимической промышленности.

### *2. Применение энергетического газа.*

Полученный в процессе газификации угля генераторный газ может быть эффективно использован в качестве энергоносителя в различных отраслях промышленности, включая:

- топливно-энергетический комплекс;

- металлургии;

- химической промышленности, где требуется термическая энергия или газовая среда с определенными свойствами.

### *3. Применение технологического газа.*

В зависимости от компонентного состава, технологический газ может быть направлен на синтез важнейших продуктов, таких как:

- аммиак ( $\text{NH}_3$ );
- карбамид ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ );
- метанол ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), синтез-газ и другие органические соединения, используемые в химическом производстве.

#### 4. Применение водорода ( $\text{H}_2$ ), полученного в результате газификации угля:

- в качестве химического реагента для синтеза водородсодержащих соединений;
- в качестве восстановителя в металлургии для извлечения металлов из их оксидов и солей;
- как высокоэффективный источник энергии для топливных элементов и тепловых установок;
- использование в маломасштабных энергосистемах, автономных энергоустановках и в промышленных котлах для получения пара.

#### 5. Внедрение двухступенчатого реактора-газогенератора.

Разработанная конструкция двухступенчатого реактора-газогенератора обеспечивает:

- снижение энергетических затрат за счет рационального использования тепла;
- повышение термической эффективности всего процесса;
- точную управляемость термохимическими стадиями (термолиза и газификации);
- увеличение выхода целевых продуктов при одновременном снижении доли не переработанных остатков.

## Список литературы

### Список использованных источников:

1. Стратегия развития промышленности Республики Таджикистан до 2030г.[http://www.portalihuquqi.tj/publicadliya/view\\_qonunhoview.php?showdetail=&asosi\\_id=8428](http://www.portalihuquqi.tj/publicadliya/view_qonunhoview.php?showdetail=&asosi_id=8428)
2. Концепция развития угольной отрасли в Республике Таджикистан на период до 2040 года. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 30.08.2019 года, №436. [http://portalihuquqi.tj/publicadliya/view\\_qonunhoview.php?showdetail=&asosi\\_id=22555](http://portalihuquqi.tj/publicadliya/view_qonunhoview.php?showdetail=&asosi_id=22555) (Дата обращения 22.07.25).
3. Кирсанов, А.К. Обзор угольной промышленности Республики Таджикистан / А.К. Кирсанов, Н.А. Шкаруба, Г.С. Курчин, Е.С. Майоров, У.Р. Тешаев // Уголь, 2023. №8. – С.107-112.
4. Абдурахманов, Б.А. Угольная промышленность Таджикистана, состояние и перспективы развития / Б.А.Абдурахманов, Р.В. Охунов // Душанбе: Недра. -2011. – 248с.
5. Справочник азотчика, изд.2-е, под ред. Е.Я. Мельникова. М.: Химия, 1986. –512 с.
6. Караваев, Н.М. Способы использования углей Зеравшанской долины в промышленности и технико-экономические показатели / Н.М. Караваев, З.А. Румянцева, З.И. Певзнер З.И. и др. // Душанбе: АН Таджикской ССР. - 1963.–156 с.
7. Кабилов, Ш.К. Геология, угленосность и качественная характеристика Фон-Ягнобского месторождения / Ш.К. Кабилов // дисс. на соис.уч. степени канд. геол. -мин. наук. Душанбе: Госгеолфонд. -1962.
8. Лучников, В.С. Перспективы угленосности Таджикистана / В.С. Лучников // Душанбе: Госгеолфонд, 1995. -125 с.
9. Баратов, Р.Б. Геология и полезные ископаемые Таджикистана / Р.Б. Баратов // Душанбе: Ирфон. -1999. -165 с.

10. Джамолзода, Б.С. Исследование антрацита месторождения Назар-Айлок как сырья для производства электродного термоантрацита / Б.С. Джамолзода А. Муродиён, К. Кабутов и др. // Доклады АН РТ, 2015. - Т.58, №10. - С. 929-935.

11. Муродиён, А.Ш. Научно-практические основы переработки и использования местного углеродсодержащего сырья в производстве алюминия / А.Ш. Муродиён // автореферат дисс. на соис. учёной степени доктора техн. наук по спец. 05.02.01, Душанбе: ИХ имени В.И. Никитина НАНТ. - 2020.

12. Состояние угольного сектора Республики Таджикистан / Подготовлено Экологической организации “Маленькая Земля” // <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2017/12/coal-tadj-rev-ru17.pdf>.

13. Мингбоев, Ш.А. Физико-химические основы переработки углей Таджикской депрессии / Ш.А. Мингбоев // дисс. на соис. ученой степени канд. хим. наук по спец. 1.4.4-Физическая химия, Душанбе: Институт химии имени В.И. Никитина НАНТ. - 2023. - 95с.

14. Плакиткин, Ю.А. Уголь как основа большого цивилизованного “скачка” и новых возможностей мирового развития / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, К.И. Дьяченко // Уголь, 2022, №8. – С.77-83.

15. Яновский, А.Б. Уголь битва за будущее / А.Б. Яновский // Журнал “Перспективы угольной промышленности”, 2020, №8. – С.9-14.

16. Бекаев, Л.С., Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Л.С. Бекаев, О.В. Марченко, С.П. Панегин и др. // Новосибирск: Наука. 2000. - 300 с.

17. Ткач, С.М. О закономерности развития угольной промышленности / С.М. Ткач, В.Л. Гаврилов // Проблемы недропользования, 2019, №3. – С.15-25.

18. Умаров, Х.У. Биоклиматический потенциал Таджикистана: проблемы устойчивости и эффективности в его использовании / Х.У. Умаров,

Х.М.Мухаббатов // Экономика Таджикистана: стратегия развития, 2005, №3. – С. 76-81.

19. Рахманкулов, Д.Л. О проблеме истощения мировых запасов нефти / Д.Л.Рахманкулов, С.В.Николаева, Ф.Н. Латыпова Ф.Н., Ф.Ш. Вильданов,Ф.Ш.// Башкирский химический журнал. 2008. Т.15., №2. – С 5-15.

20. Шумейко, М.В. Уголь важнейший источник органического синтеза / М.В. Шумейко. Горная промышленность. 2008. №6 – С. 342-354 <file:///C:/Users/User/Downloads/ugol-vazhneyshiy-alternativnyy-istochnik-organicheskogo-syrya.pdf> (Дата обращения 22.07 2025).

21. Максимов, В.А. Исследования рынков основных энергоносителей (факторный анализ и прогноз)/ В.А.Максимов, В.В.Анюшин, И.П. Чернов и др.// Уфа: из-во БГУ, 1999. – 200 с.

22. Дегтяров, А.Н. Эволюция отраслевых рынков и нефтегазовый бизнес /А.Н.Дегтярев, В.А. Максимов, В.В.Аношин// Уфа: РИО БГУ, 2010. – 101 с.

23. Рахманкулов, Д.Л. Успехи и проблемы производства альтернативных источников топлива и химического сырья / Мат. перв. Всерос. науч.- тех.конф. “Альтернативные источники химического сырья и топлива”// Уфа: Изд-во “Реактив”, 2008. – С. 7-14.

24. Назаренко М.Ю., Салтыкова С.Н. Природные энергоносители. Санкт-Петербургский горный университет. 2020. - 103 с.

25. <https://svspb.net/norge/potreblenie-uglja-stran.php> (Дата обращения 17.07.2025)

26. Прогноз развития энергетики Мира и России / А.А. Макаров, В.А. Кулягин, Д.А. Грушевенко, А.А. Галкиной. ИНЭИ РАН. Москва, 2024. – 208 с. – ISBN 978-5-91438-038-7 2024. Москва. 2024.

27. Плакиткин, Ю.А. Парижское соглашение как фактор ускорения «энергетического перехода» меры по адаптации угольной отрасли к новым

вызовам/ Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина // Уголь. 2021. № 10. С. 19-23. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-10-19-23.

28. Грязнова, В.А. Глобализация углеродного рынка: возможности и ограничения/ В.А.Грязнова, Н.А.Пискулова// Журнал “Мировое и национальное хозяйство”, 2023, № 2(62). - С. 112-121.

29. Джафаров, Б.А. Характеристика угольных месторождений Таджикистана и определение их состава/ Б.А.Джафаров//Вестник педагогического университета. №4 (16). 2022. – С. 245-253.

30. Хомутов, И. Углубленный анализ динамики спроса на уголь в Таджикистане до 2050 г./ И.Хомутов// Круглый стол. г. Душанбе, 2022. -С. 55-61.

31. Бахриддинзода, Ш.Б. Технологические факторы использования угля / Ш.Б. Бахриддинзода, Т.Х. Гадоев, Г.Г. Шодиев, З.Х. Гайбуллаева //Материалы республиканской научно-практической конференции (с международным участием) «Теплотехника и теплофизические свойства веществ», Душанбе, 27-28 ноября 2023 г. - С. 96-100.

32. Гайбуллаева, З.Х. Экологические аспекты проблем возникающих при использовании природных энергоносителей/ З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Материалы III-ей Международной научно-практической конференции «Роль женщин-учёных в развитии науки, инноваций и технологий», Таджикистан, г. Гулистан, 24-26 августа 2022г. - С. 246-253.

33. Коганович, Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогноз Новосибирск: Наука, 1989. – С. 222- 231.

34. World energy and transition to sustainable development | L.S. Belyaev, O.V. Marchenko, S.P. Filipov, S.V. Solomin, N.V. Stepanova, A.I. Kokorin. Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 76 -91.

35. Ольховская, Г.Г. Газификация твердых топлив в мировой энергетике / Г.Г. Ольховская // Теплоэнергетика, 2015, №7. – С. 3-11.

36. World Energy Resources: World Energy Council, 2016.
37. Тугов, А.Н. Современные технологии термической переработки ТКО и перспективы их реализации в России / А.Н. Тугов // Теплотехника, 2021, № 1. – С. 5-22.
38. Оценка технико-экономического потенциала глубокой переработки каменного угля УОР «Караканский-Западный» // Фрейсбергская горная академия. Институт технологий энергопроизводства и химической и химической технологии. Фрейберг, Германия. 2017.
39. Филиппов, С.П. Кийко, А.В. Обзор прорывных технологий в газовой и угольной энергетике и рекомендации по внедрению их в России: Анализ записки / С.П. Филиппов, А.В. Кейко. М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 110 с.
40. Кличова, Ш.А. Экологические проблемы, возникающие от влияния цементного производства на окружающую среду / Ш.А. Кличова // Международный научный журнал «Вестник науки», №4 (73), Т.4, апрель 2024. – С. 909-914.
41. Башмаков, И.А. Перспективы развития декарбонизации цементной промышленности мира / И.А. Башмаков // Фундаментальная и прикладная климатология, 2023, Т.9, №1. - С. 33-64.
42. Обзор Евразийского банка развития «Угольная промышленность в странах ЕАБР», Душанбе, 2016. – 215с.
43. Исследование процесса рассеивания выбросов загрязняющих веществ одиночного промышленного источника в приземном слое атмосферного воздуха: Метод. указания к лаб. раб. / Сост. Ю.А. Копытин, Г.Ф. Несолёнов – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2021. – 25 с.
44. Experimental study on evaluation of underground coal gasification with a horizontal hole using two different coals / Akihiro Hamaoka, Fa-qiang Su, Ken-ichi Takura (et al.) // J. Fuel. 2021. No 305, - P. 121-128.
45. Лавров, Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива / Н.В.Лавров // М.: Металлургиздат, 1957. – 340 с.

46. Нехорошков, В. Влияние декарбонизации на развитие угольной промышленности / В.Нехорошков, Д.А.Соколова / Journal of Economy and business// 2022, vol. 6-2 (88), - P. 100-104.

47. Петров, И.В. Предложения по декарбонизации угольной промышленности и устойчивому развитию обособленных регионов на основе подземной газификации углей/ И.В. Петров, И.И. Уткин, В.Б. Джайянт // Уголь, 2022, №9. С. 41-47. DOI: 18796/0041-5790-2022-9-41-47.

48. Харионовский, А.А. Современное экологическое состояние Кузбасса/ А.А.Харионовский, М.Ю.Данилова //Научно технический журнал: Вестник, 2018, №3. - С. 88-96.

49. Minerals Council of Australia. New generation Coal Technology, Why HELLE coal –fired power generation is part of Australia’s energy solution.8, 2011.

50. Горлов, Е.Г. Состояние и перспективы комплексного использования твердых горючих ископаемых / Е.Г.Горлов// М.: Издательство НТК “Трек”, 2011. – 376 с.

51. Горлов, Е.Г. Синтетические жидкие топлива- новые возможности и перспективы / Е.Г.Горлов,А.В.Шумовский // Neftegaz. RU. 2019, № 9. – С. 214-219.

52. Хайтун, С.Д. Энергетика, построенная на круговороте тепла и вечных двигателях 2-го рода /С.Д. Хайтун // М.: Издательство URSS, Ч.1., 2-13. - 192 с.

53. Смил, В. Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики/ В.Смил // М.: АСТПРЕСС КНИГА, 2012. - 272 с.

54. Force conference on Clean Coal Technology’s, 2009. [www.iea-coal.org.uk](http://www.iea-coal.org.uk).

55. Доброхотов, Н.Н. Расчет газогенераторов и газогенераторного процесса/ Н.Н.Доброхотов//Петроград: ВСНХ, 1922. - 33 с.

56. Гинзбург, Д.Г. Газификация топлива и газогенераторные установки /Д.Г.Гинзбург// М.-Л:Гизлегпром, 1938. - 604 с.

57. Рамбуш, Н.Э. Газогенераторы. Перевод с англ. П.Г. Рашковского /Н.Э.Рамбуш// Москва, Ленинград, 1939. -301 с.
58. Шишаков, Н.В. Основы производства горючих газов /Н.В.Шишаков// М.: Энергоиздат, 1948. - 479 с.
59. Чуханов, З.Ф. Вопросы теории горения углерода – кокса и пути развития техники сжатия и газификации твердых топлив/ З.Ф.Чуханов // Известия АН СССР, 1953, №4. - С. 562-568.
60. Вулис, Л.А. Тепловой режим горения /Л.А.Вулис// М.: Госэнергоиздат, 1954. - 281 с.
61. Альтшуллер, В.С. Методы интенсификации работы промышленных газогенераторов/В.С. Альтшуллер// М.: Недра, 1955. - 250 с.
62. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В.Канторович// М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 598 с.
63. Кнорре, Г.Ф. Топочные процессы /Г.Ф.Кнорре//Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 396 с.
64. Дешалит, Г.И. Расчет процессов газификации топлива /Г.И.Дешалит// Харьков:Вища школа, 1959. – 136 с.
65. Альтшуллер, В.С. Новые процессы газификации твердого топлива /В.С.Альтшуллер// Москва: Недра. 1976. – 154 с.
66. Фальбе, Ю.Химические вещества из угля/Ю.Фальбе// М.: Химия, 1980.- 619с.
67. Хоффман, Е. Энерготехнологическое использование угля /Е.Хоффман// М.: Энергоатомиздат, 1983. - 328 с.
68. Шиллинг, Г.Д.Газификация угля. Пер. с нем., под ред. С.Р.Исламова/ Г.Д.Шиллинг, Б.Бонн,У.Краус// М.: Недра, 1986. - 176 с.
69. Афанасьев, В.В. Анализ технологий газификации твердого топлива /В.В.Афанасьев, В.Г.Ковалев, В.А.Тарасов// Вестник Чувашского университета, Серия: Электротехника и электроэнергетика, 2010. №3. – С. 194-199.

70. Копытов, В.В. Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. Альтернативная энергетика и экология /В.В.Копытов// №6 (98). 2011. - С. 29-77.

71. Максимов, В.А., Аношин, В.В., Чернов, И.П. и др. Исследования рынков основных энергоносителей (факторный анализ и прогноз). - Уфа: из-во БГУ, 1999. – 200 с.

72. Дегтяров, А.Н., Максимов, В.А., Аношин, В.В. Эволюция отраслевых рынков и нефтегазовой бизнес. – Уфа: РИО БГУ, 200. – 101 с.

73. Рахманкулов, Д.Л. Успехи и проблемы производства альтернативных источников топлива и химического сырья // Мат. Перв. Всерос. науч.- тех. конф. “Альтернативные источники химического сырья и топлива”. - Уфа: Изд-во “Реактив”, 2008. – С. 7-14.

74. Тимофеева, С.С., Смирнов, Г.И. Перспективы использования угля как основного ресурса в условиях четвертого энергетического перехода. Энергетика и рациональное природопользование. <file:///C:/Users/%D0%B0%D0%B4%D0%BC%D0%B8%D0%BD/Downloads/perspektivy-ispolzovaniya-uglya-kak-osnovnogo-resursa-v-usloviyah-chetvertogo-energeticheskogo-perehoda.pdf>. Дата обращения 26.06.2024 г.

75. Юницкий, А.З., Василевич, В.В., Арнаут, С.А., Францкевич, А.В. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при использовании бурого угля за счет его глубокой переработки. Сборник материалов IV международной конференции “Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты. 2023. – С. 352-356.

76. Гайбуллаева, З.Х. Моделирование процесса газификации угля / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Г.Х. Карамирзоева. Сборник материалов IV Международной конференции «Роль женщин ученых в развитии науки, инноваций и технологий». -Худжанд, 2023. – С. 20-25.

77. Nechno-Economic Analysis of Hydrogen Production by gazification of bion / Lau F.S., Bowen D.A., DiHu R. Et I / report of gaz Technology Inst. 2002. -154 p.

78. Rezaiyan J. Cheremisinoff N.P. Gasification technologies. A primer for engineers and scientists. – Paris: Marcel Dekker, 2015. - 272 p.

79. Асланян, Г.С. Экологически чистые угольные технологии: аналитический обзор. / Г.С. Асланян // – М.: Центр энергетической политики. 2004. – 66 с.

80. Узназаров, И.М. Энергетический кризис в Европе и перспективы низкоуглеродной экономик / И.М.Узназаров // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Общественные науки. 2022. №2. – С. 95-101.

81. Галькеева, Г. А. Разработка энергоэффективного и ресурсосберегающего способа газификации водоугольного топлива. // Дисс. на соис.уч. степени к.т.н., 2019. Казань. – 135 с.

82. Энергетика XXI века: условия развития, технологии, прогнозы / С. Беляев, А.В. Лагерев, В.В. Посекалин и др.; Отв. Ред. И.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2004. – 386 с.

83. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Беляев Л.С., Мароченко О.В., Филиппов С.П. и др. – Новосибирск: Наука, 2000. – 269 с.

84. Перспективы энергетических технологий. Стратегии и сценарии до 2050 г. Технологии и экономика мировой энергетике до 2050 г./ Доклад Междунар. Энергетич. Агентства ОЭСР/МЭА). Под. Ред. Н.Херста: пер. А.О. Кокорина. – М.: WWF России, 2007. - 464 с.

85. Муллина, Е.Р. К вопросу повышения селективности флотационного обогащения углей с применением неорганических реагентов-модификаторов/ Е.Р.Муллина, О.А. Мишурина, Л.В.Чупрова// Современные наукоемкие технологии. - 2015. - №8. – С. 41-44.

86. Химические вещества из угля. –М.: Химия, 1980. - 616 с.

87. Касаточкин, В.И., Ларина, Н.К. Строение и свойства природных углей. –М.: Недра, 1975. - 159 с.

88. Терентьев, Г.А., Тюков В.М., Смаль, Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. –М.: Химия. 1989. - 272 с.

89. Кричко, А.А., Лебедев, В.В., Фарберов И.Л. Нетопливное использование углей. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

90. Касенова, Ж.М. Пиролитическая декомпозиция углей месторождений Казахстана при подземном нагреве // Дисс. на соиск. звания канд. техн. наук. Томск. 2022. – 175 с.

91. Такайшвили, Л.Н., Агафонов Г.В. Тенденции и перспективы использования энергетических углей Восточной Сибири/ Л.Н. Такайшвили, Г.В. Агафонов// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2022, Т. 333, №3. – С.15-28.

92. Алеханович, А.Н. Энергетические угли: учеб. пособие/ А.Н. Алеханович// Челябинск: Цицеро, 2016. – 164 с.

93. Николаев, С.В., Латыпова, Ф.Н., Шавшукова, С.Ю. Современные процессы переработки угля. Башкирский химический журнал. 2019. Т.16. №3. - С. 122-132.

94. Артемьев, Б.В., Еремин, И.В., Гагарин, С.Г. Петрография углей и их эффективное использование. М.: Недра коммюникейшинс ЛТД, 2000. – 334 с.

95. Хоффман Е. Энерготехнологические использование угля. М.: Энергоатомиздат. 1983. - 328 с.

96. Охунов Р.В., Ёров З.Ё., Негматов И.И. Фон-Ягноб. Атлас справочник. Д.: Промэкспо, 2017. - 171 с.

97. Портнов, В.С., Раимжанов, Б.Р., Юров, В.М., Иманбаева, С.Б. Влияние влаги на природную газоносность угольных и нефтяных пластов. International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences ISSN: 2181-144X. Vol.3(1). 2022. - P. 42-50.

98. Чернышева, Е.Н. Влага в углях как параметр качества продукции // Уголь, 2016, - №7. – С. 125-128.

99. Петров, И.Я., Осипов, А.Б., Богомолов, А.Р. Каталитическое ожижение углей: перспективный способ производства топлив и ценных химических соединений. Часть 5. Факторы, влияющие на процесс ожижения углей: текстура

угля и его гранулометрический состав // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021, №6 (148). - С. 27-39. -DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-27-39.

100. Муродиён, А. Техничко-экономические показатели производства синтез-газа на основе использования местных угольных месторождений / А. Муродиён, Б.С. Азизов, Х.А. Мирпочаев, Б.С. Джамолзода, Н.Ю. Пулодов, Х.С. Сафиев // Вестник педагогического университета им. С. Айни. - Душанбе, 2022. №1 (10-11). – С. 51-56.

101. Сафиев, Х.С. Получение синтез-газа из углей Фан Ягнобского месторождения / Х.С.Сафиев, Р.Усманов, Б.С. Азизов, Х.А. Мирпочаев, Ф.У.Сайдалиев, Э.Х. Каримов // Доклады АН РТ. 2012, Т.72, №7. – С. 577-581.

102. Патент Евразии № 037398. Способ газификации угля для производства тепла и химических веществ / А.Шарифов, З.Х. Гайбуллаева, Ф.Б. Хамроев, Г.Г. Шодиев // опубл. 24.03.2021.

103. Малый патент РТ ТЈ №1415 от 14.08.2023. Способ газификации угля в двухступенчатом реакторе / З.Х. Гайбуллаева, А.Шарифов, Б.И. Асроров, Т.Х. Гадоев, Ш.Б. Бахриддинзода.

104. Гайбуллаева, З.Х. Газообразование при взаимодействии угля с кислородом // З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Политехнический вестник . Серия: Инженерные исследования, 2023, № 2 (62). – С. 105-112.

105. Гадоев, Т.Х. Исследование процесса термического разложения при его газификации / Т.Х. Гадоев, Ш.Б. Бахриддинзода, Ф.Х. Рахимов, Б.И. Асроров, З.Х. Гайбуллаева / Известия НАНТ, 2025, №2 (199). - С. 145-152.

106. Гайбуллаева, З.Х. Термическая обработка угля Фон-Ягнобского месторождения для выделения летучих веществ его состава / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Ф.М. Рахимов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Доклады НАНТ, 2025, №6. Т.68. – С. 598-607.

107. Гайбуллаева, З.Х. Термогравиметрический анализ выделения летучих веществ углей Фон-Ягнобского месторождения // З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Ф.М. Рахимов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода / Вестник ТТУ, 2025, №5. - С. 45-57.

108. Иоффе, И.И. Инженерная химия гетерогенного катализа / И.И. Иоффе, Л.М.Письмен //Л.: Химия,1972. – 464 с.

109. Касенова, Ж.М. Пиролитическая декомпозиция углей месторождения Казахстана при подземном нагреве. Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук, Томск, 2022, -176 с.

110. Померанцев, В. Основы практической теории горения // В. Померанцев // Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.

111. Химическая энциклопедия [Электронный ресурс].URL: [http://studopedia.ru/3\\_191375\\_ramennie-ugli.html](http://studopedia.ru/3_191375_ramennie-ugli.html) (дата обращения: 10.03.2025).

112. Аллеханович, А.Н. Влияние минеральной части на показатели и характеристики энергетических углей [Электронный ресурс URL: <http://www/chipk.ru/data/conf4/k07pokozateli.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).

113. Звягинцев, Е.В. Оценка реакционной способности углеродных материалов на основе термогравиметрических данных / Е.В. Звягинцев, Г.Б. Скрипченко / Химия твердого топлива, 2000, №5. – С. 67-78.

114. Патент РФ №2413749 С2. Способ переработки угля и устройство для его осуществления / А.В. Степанов, Е.В. Полункин, В.Н. Николаенко, Г.Г. Матусевич, Е.М. Белявская. Способ переработки угля и устройство для его осуществления. ОАО УКРНЕФТИХИМПРОЕКТ. UA. (опубликован 2017).

115. Шарифов, А. Экологические проблемы использования угля в качестве энергоносителя и способы их решения /А. Шарифов, Г.Г. Шодиев, Т.С. Бобоев, Д.К. Субхонов // Вестник Таджикского технического университета. Душанбе, 2015, №4 (32). - С.183-188.

116. Гайбуллаева, З.Х. Безотходная технология газификации угля для получения тепла и химических веществ/ З.Х. Гайбуллаева, Ш.Б. Бахриддинзода,

Б.И. Асроров, Г.Т. Насимов, А. Шарифов // Горный журнал, 2022, №9. - С. 62-68.

117. Гайбуллаева, З.Х. Ресурсосберегающая технология переработки угля месторождения Фон-Ягноб / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А. Шарифов // Доклады НАНТ. 2023, Т.66, №3-4. - С. 230-234.

118. Бондаренко, В.Л. Мембранное разделение газовых смесей на основе компонентов воздуха / В.Л. Бондаренко, Н.П. Лосяков, Ю.М. Симоненко и др. // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана, Серия “Машиностроение”. 2012. - С. 20-40.

119. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик //М.: Гос. изд-во по физ.-мат. Литературы. 1972. – 721 с.

120. Шарифов, А. Использование золы угля Фон-Ягнобского месторождения в качестве наполнителя композиций из гипсовых вяжущих / А. Шарифов, Г.Г. Шодиев, Д.К. Субхонов, Т.С. Бобоев // Доклады АН РТ. 2016. Т. 59. № 9.-10. - С. 413-417.

121. Химический состав и условия образования Ag-Cu-Pb-Bi-сульфосолей в Конимансурском рудном поле / Н.С. Бортников, В.А. Коваленков, Ю.Г. Сафонов [и др.] // Известия АН СССР. Серия геологическая. -1985, -№9. - С. 65-75.

122. Саидов, З.Ш. Состояние и перспектива развития горной и металлургической промышленности Республики Таджикистан / З.Ш. Саидов // Горный журнал. Цветные металлы. Специальный выпуск. – 2003. - С.13-16.

123. Нурматов, С.К. Адрасманский горно–обогатительный комбинат: ориентир на выпуск конечного продукта / С.К. Нурматов, М. Пулатов // Цветные металлы. Специальный выпуск. – 2003. -№8 (03). – С. 44-47.

124. Марченко, Н.В. Металлургия тяжелых цветных металлов / Н.В. Марченко. Красноярск: СФУ, 2009. - 392 с.

125. Ванюков, А.В. Плавка в жидкой ванне. / А.В. Ванюков. М.: Металлургия. 1988. - 320 с.

126. Тихомиров, Е.Н. Восстановительные газы и кислород в доменном производстве / Е.Н. Тихомиров. -М.: Metallurgy, 1982. –104 с.

127. Технологическая схема получения восстановительного газа для металлургии в УСТК-ВГ / И.Г. Зубилин, А.А. Тараканов, А.Н. Минасов, Н.В. Браун // Кокс и химия. -1988. - С.25-27.

128. Томаш, М.А. Применение пароводяной конверсии природного газа в доменном производстве / М.А. Томаш, А.В. Сущенко. // Вестник Приазовского державного технического университета. Серия технических наук. -2011. - Вып.22. - С.31-35.

129. Разработка экологически чистых плазменно-мембранной технологии получения восстановительных газов в металлургии / Сборник научных трудов «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке». – М., 1994. –Т.2. – 223 с.

130. Синяк, Ю.В. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях централизованного производства / Ю.В. Синяк, В.Ю. Петров // <https://cyberleninka.ru>.

131. Радченко, Р.В. Водород в энергетике: Учебное пособие / Р.В. Радченко, А.С. Макрушин, В.В. Тюльпа. –Екатеринбург: Изд-во «Урал», 2014. – 229 с.

132. Малый Патент РТ № ТЈ 1052. Способ получения гидридов металлов / З.Х. Гайбуллаева, Г.Т. Насымов, А. Шарифов. 2019.

133. Евразийский патент № 039523. Способ получения гидридов металлов / З.Х. Гайбуллаева, Г.Т. Насымов, А. Шарифов. 2020.

134. Гайбуллаева, З.Х. Гетерогенные процессы восстановления свинца из галенит содержащего концентрата газами / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насымов, А. Шарифов // Доклады АН РТ. 2020. Т. 63. №5-6. - С. 368-373.

135. Гайбуллаева, З.Х. Закономерности гетерогенных процессов восстановления свинца из галенит содержащего концентрата газами / З.Х.

Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насымов, А. Шарифов // Доклады АН РТ. - 2020. - Т. 63, - №9-10. - С. 631-637.

136. Бахриддинзода, Ш.Б. Получение восстановительных веществ способом переработки углей месторождения Фон-Ягноб / Ш.Б. Бахриддинзода, Б.И. Асроров, З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. Душанбе, - №4 (52), - 2021. - С.15-20.

**Список научных публикаций соискателя ученой степени по теме  
диссертации**

***Статьи, опубликованные в научных журналах рекомендованных ВАК при  
Президенте республики Таджикистан***

**1-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Закономерности гетерогенных процессов восстановления свинца из галенитсодержащего концентрата газами / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насымов, А. Шарифов // Доклады АН РТ. - 2020. - Т.63. - № 9-10. - С. 631-637. ISSN 0002-3469.

**2-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Гетерогенные процессы восстановления свинца из галенитсодержащего концентрата газами / З.Х. Гайбуллаева, Г.Т. Насымов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А. Шарифов // Доклады АН РТ. - 2020. - Т.63. - №5-6. - С. 368-373. ISSN 0002-3469.

**3-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Получение восстановительных веществ способом переработки углей месторождения Фон-Ягноб / Ш.Б. Бахриддинзода, Б.И. Асроров, З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. - 2021. - №3 (55). - С.92-96. ISSN 2520-2227.

**4-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Безотходная технология газификации угля для получения тепла и химических веществ / З.Х. Гайбуллаева, Ш.Б. Бахриддинзода, Б.И. Асроров, А. Шарифов // Горный журнал. - 2022. - №9. - С.62-68. ISSN 0017 - 2278. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.11.

**5-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Газообразование при взаимодействии угля с кислородом // З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода

// Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - Душанбе 2023. - № 2 (62). – С. 105-112. ISSN 2520-2227.

**6-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Ресурсосберегающая технология переработки угля месторождения Фон Ягноб / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А.Шарифов // Доклады НАНТ. - 2023, - Т. 66. - № 3-4. - С. 230-236. ISSN 2791-1489.

**7-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Термическая обработка угля Фон-Ягнобского месторождения для выделения летучих веществ его состава / З.Х. Гайбуллаева, Т.Х. Гадоев, Ф.М. Рахимов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Доклады НАНТ, - 2025. - №6. - Т.68. - С. 598-607. ISSN 2791-1489.

**8-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Исследование процесса термического разложения угля при его газификации / Т.Х. Гадоев, Ш.Б. Бахриддинзода, Ф.Х. Рахимов, Б.И. Асроров, З.Х. Гайбуллаева // Известия НАНТ. - 2025. - №2 (199). - С.145-152. ISSN 2791-2337.

#### *Публикации в материалах научных конференций*

**9-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Активность палладиевого катализатора в реакции получения гидрида алюминия / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насимов // Материалы республиканской научно-практической конференции с участием международных организаций «Инновационное развитие науки» 10 декабря 2020 г, г. Душанбе. - С.33-35.

**10-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Изучение восстановления окиси металлов состава полиметаллических концентратов окисью углерода / З.Х. Гайбуллаева, Г.Т. Насымов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А Шарифов // Материалы республиканской научно-практической конференции с международным участием «Тепловая энергетика и теплофизические свойства веществ» 27-28 августа 2021, г. Душанбе, - С. 210-217.

**11-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Исследование процесса окисления металлов окисью углерода, полученного газификацией углей Фон Ягноб / З.Х. Гайбуллаева, Г.Т. Насимов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Материалы V

международной научно-практической конференции «Вопросы физико-химической и координационной химии». – Душанбе, 2021. - С. 168-174.

**12-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Экологические аспекты проблем возникающих при использовании природных энергоносителей / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода // Материалы III международной научно-практической конференции «Роль женщин-учёных в развитии науки, инноваций и технологий». - 2022, - г. Гулистан, - С. 246-252.

**13-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Переработка сульфидных свинец содержащих концентратов восстановительными газами / Ш.Б. Бахриддинзода // Материалы XIII международной теплофизической школы «Теплофизика и информационные технологии». 17-20 октября 2022 г, -г. Душанбе. – С. 192-195.

**14-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Получение металлов из свинцово цинковых руд месторождения Кони Мансур (Таджикистан)/ З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А. Шарифов/ Материалы XV международной конференции «Металлургия цветных редких и благородных металлов» имени члена- корреспондента РАН Г.Л. Пашкова, 6-8 сентября 2022 г. – Красноярск, Россия. – С. 172- 175.

**15-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Технологические факторы использования угля / Ш.Б. Бахриддинзода, Т.Х. Гадоев, Г.Г. Шодиев, З.Х. Гайбуллаева //Материалы международной научно-практической конференции с международным участием «Теплоэнергетика и теплофизические свойства» посвящённой объявлению 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». Душанбе, 2023. - С. 96-100.

**16-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Водородная технология и экологическое равновесие / Т.Х. Гадоев, Ф.М. Рахимов, Ш.Б. Бахриддинзода, Б.И. Асроров., З.Х. Гайбуллаева/ Материалы XX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ» конгресса и выставки «Цветные металлы и минералы». Секция металлургия

цветных и редких металлов. 15-20 апреля 2024. г. Красноярск, Сибирский Федеральный университет. - Россия. Сертификат № 32958-2024.

**17-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Исследование кинетических закономерностей извлечения свинца из полиметаллических концентратов / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, А. Шарифов/ Материалы XII международного конгресса и выставки «Цветные металлы и минералы». Секция металлургия цветных и редких металлов. 19-3 сентября 2024. г. Красноярск, - Россия. Сертификат.

### *Патенты и изобретения*

**18-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Малый Патент №1348 ТЈ, МПК: С10Ј 3/00. Способ получения восстановительных веществ при переработке угля / З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насимов // №2201619, заяв. 05.01.2022, опубл. 10.02.2023, бюл №192, 2023.

**19-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Малый Патент № 1415 ТЈ, МПК С1 0Ј 3/00 Способ газификации угля / З.Х. Гайбуллаева, Б.И. Асроров, А. Шарифов, Т.Х. Гадоев, Ш.Б. Бахриддинзода, Н.Т. Яхьяев // № 2301837, заяв. 18.05.2023 г.; опубл. 4.08.2023, бюл. №197, 2023.

**20-А. Бахриддинзода, Ш.Б.** Патент Евразии №047175. Способ получения восстановительных веществ при переработки угля / З.Х. Гайбуллаева, А. Шарифов, Б.И. Асроров, Ш.Б. Бахриддинзода, Г.Т. Насимов // №047175; заявл. 14.02.2023, опубл. 17. 06. 2024 г., бюл. Евразийского патентного ведомства «Изобретения (евразийские заявки и патенты)» №6/2024.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН		ИДОРАИ ПАТЕНТӢ
<b>НАХУСТПАТЕНТ</b>		
№ ТҶ 1415		
<b>БА ИХТИРОИ</b>		
<i>Ғарзи газноккунии ангишт</i>		
Дорандаи нахустпатент	Гайбуллаева Зумрат Хабибовна	
Сарзамин	Ҷумҳурии Тоҷикистон	
Муаллиф(он)	Гайбуллаева Зумрат Хабибовна, Асроров Баҳодур Илқомович, Шарифов Абдумунин, Ғалоев Тоҷиддин Хуснуддинович, Назиров Яҳё Ғиёсович, Баҳриддинзода Шохин Баҳриддин	
Аввалияти ихтироъ	18.05.2023	
Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза	18.05.2023	
Аризаи №	2301837	
Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон	4 августи	с. 2023 ба қайд гирифта шуд
Нахустпатент этибор дорад аз	18 майи	с. 2023 то 18 майи с. 2033
	ДИРЕКТОР	 Исмоилзода М.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ  
ВЕДОМСТВО**(12) Описание изобретения**  
К МАЛОМУ ПАТЕНТУ

(21) 2301837

(22) 18.05.2023

(46) Вкл. 197, 2023

(71) Гайбуллоева Зумрат Хабибовна (TJ)

(72) Гайбуллоева Зумрат Хабибовна (TJ); Асроров  
Блодур Илхомович (TJ); Шарифов Абдурусол  
Гадоев Тоджиддин Хуснуллоевич (TJ); Назаров  
Явд Гайсович (TJ); Бахраддинов Шохан  
Бахриддин (TJ)

(54) СПОСОБ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

(56) 1. Патент Республики Таджикистан №974 от  
19.06.2018. Способ газификации угля для получения  
тепла и химических веществ2. Патент Республики Таджикистан № 1051 от  
16.05.2019. Способ газификации угля.(57) Изобретение относится к химической технологи  
и, а именно к способам получения технологическ  
и энергетических газов газификацией угля.Целью изобретения является оптимизация  
управления и уменьшения материально-технических  
и эксплуатационных расходов способа газификации  
угля.Поставленная цель достигается способом га  
зификации угля, включающей предварительный  
нагрев угля в реакторе, выделение из него летучих и  
смолистых веществ, использование окислителя при

газификации угля, причем газификацию осуществляют  
в цилиндрическом двухступенчатом реакторе с двойным кор  
пусом, где в верхней ступени реактора, летучие и смо  
листые вещества, выделенные при очистке угля при  
температуре 650–700°C отводятся в конденсационную  
камеру для охлаждения и последующего разделения на  
отдельные компоненты, очищенный уголь через  
выходное устройство, соединяющее верхнюю и ниж  
нюю ступени реактора, перемещается в камеру нижней  
ступени реактора с температурой 1000–1050°C, пода  
ют туда через вращающуюся колосниковую решетку  
окислитель для образования генераторного газа, кото  
рый через верхнюю часть камеры попадает в межкор  
пусное пространство реактора, тем самым нагревая его  
внутреннюю стенку, после чего его отводит в котел –  
утилизатор I для снятия остаточного тепла при полу  
чении водяного пара, образующуюся зола в нижнем  
корпусе реактора отводит в котел-утилизатор II и по  
лучают водяной пар; окислитель подает во враща  
ющуюся колосниковую решетку через входной штуцер  
реактора; водяные пары, полученные в котлах-  
утилизаторах I и II используют для газификации угле  
рода в нижней ступени реактора; в качестве окислителя  
могут быть использованы водяной пар, кислород,  
воздух, диоксид углерода или смесь из этих окисли  
телей.

ҶУМҲУРИИ  
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ  
ПАТЕНТИ

# НАХУСПАТЕНТ

№ ТҶ 1348

БА ИХТИРОИ

*Тарзи ҳосилкунии моддаҳои барқароркунанда хангоми коркарди ангишт*

Дорандаи  
нахуспатент Ғайбуллаева З.Х.

Сарзамин Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он) Ғайбуллаева З.Х., Шарифов А., Асроров Б.И.,  
Баҳриддинзода Ш.Б., Насимов Ғ.Т.

Аввалияти ихтироъ 05.01.2022

Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза 05.01.2022

Аризаи № 2201619

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 10 февралӣ с. 2023 ба қайд гирифта шуд

Нахуспатент  
эътибор дорад аз 5 январӣ с. 2022 то 5 январӣ с. 2032



ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.



ЕВРАЗИЙСКАЯ ПАТЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
ЕВРАЗИЙСКОЕ ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ



ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 047175

Название изобретения:

«СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ  
ВЕЩЕСТВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЯ»

Патентовладельцы:

ГАЙБУЛЛАЕВА ЗУМРАТ ХАБИБОВНА (Т.Д)

Изобретатели:

Гайбуллаева Зумрат Хабибовна, Шарифов Абдумумин, Асеров  
Баходур Илхомович, Бахриддинзола Шохин Бахриддин, Насымов  
Голубин Тахширнович (Т.Д)

Заявка №: 202300020

Дата подачи заявки: 14 февраля 2023 г.

Дата выдачи патента: 17 июня 2024 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан  
на изобретение с формулой, опубликованной в Бюллетене  
Евразийского патентного ведомства «Изобретения  
(евразийские заявки и патенты)» № 6 / 2024 год.

При уплате установленных годовых пошлин патент  
действует на территории государств - участников  
Евразийской патентной конвенции - Азербайджанской  
Республики, Кыргызской Республики, Республики  
Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан,  
Республики Таджикистан, Российской Федерации,  
Туркменистана.



ИВЛИЕВ Григорий Петрович  
Президент Евразийского патентного ведомства



# СЕРТИФИКАТ

подтверждает, что

**Бахриддинзода Шохин Бахриддин**

принял(-а) заочное участие в юбилейной XX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ – 2024»

Руководитель направления  
по молодежной науке  
Офиса развития научной  
деятельности СФУ

К. А. Кистерский

№ 32958 -2024

XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС И ВЫСТАВКА  
«ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И МИНЕРАЛЫ»



# Сертификат

участника секции

«Металлургия цветных и редких металлов»

**БАХРИДИНЗОДА ШОХИНИ БАХРИДИН**

Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими

На секции представлен доклад

*«Исследование кинетических  
закономерностей извлечения свинца из  
полиметаллических концентратов»*

Председатель Оргкомитета

проф., д.х.н. П.В. Поляков

9-13 сентября 2024  
Красноярск, Россия

XXVI Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий



«АРХИМЕД 2023»

*ДИПЛОМ*

Решением Международного Жюри  
награждается

**СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ**

*Гайбуллаева Зумрат Хабибовна, Шарифов Абдумумин,  
Асроров Баходур Ильхомович, Бахриддинзода Шохин Бахридин,  
Насымов Голибшо Такдирович*  
for the project: «Технологическая схема способа получения  
восстановительных веществ при переработке угля»

Председатель  
Международного Жюри,  
академик,  
вице-президент РАН

С.М. Алдошин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности

Ю.С. Зубов

Россия, Москва, 28.03 - 30.03.2023 г.