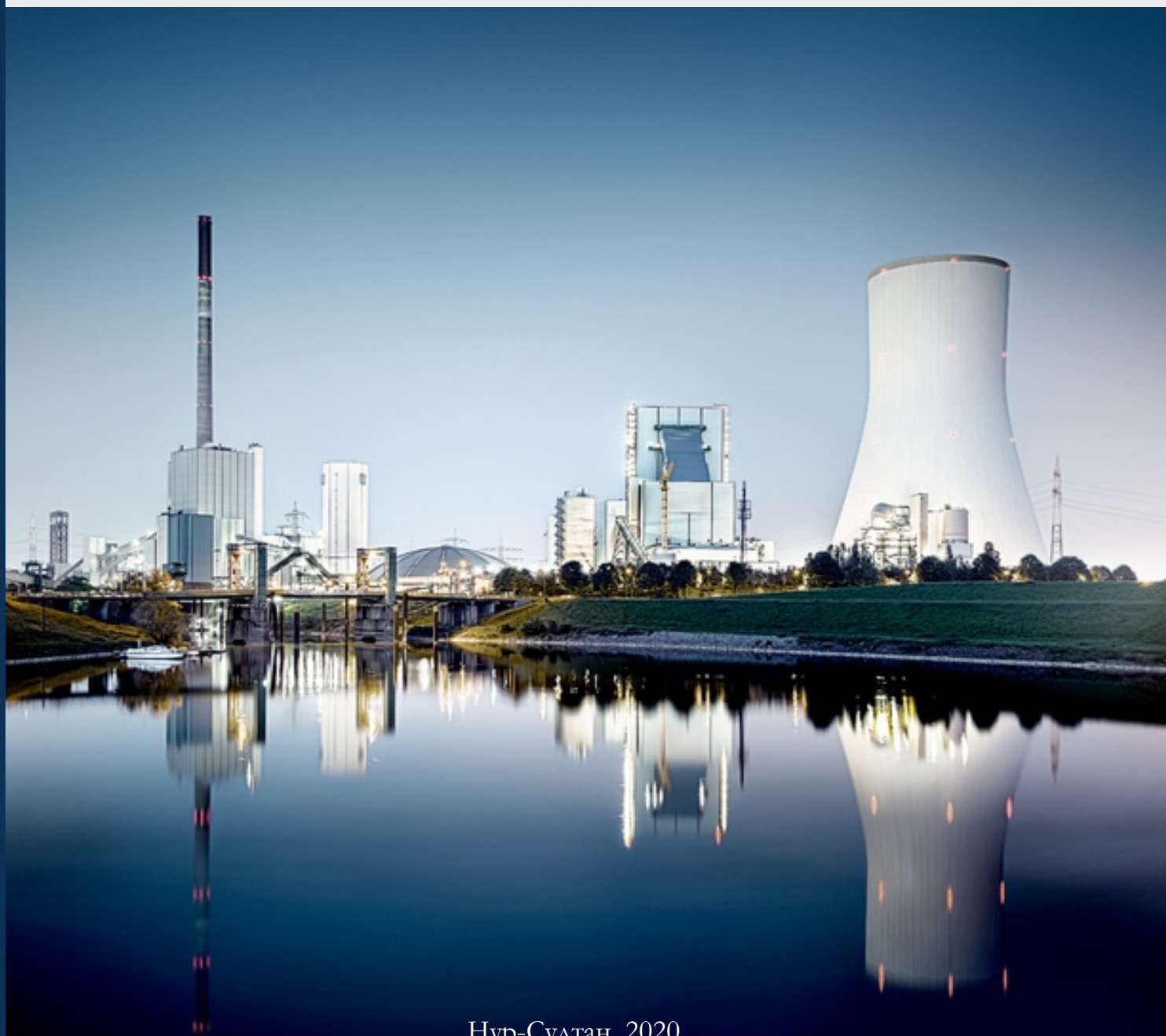


СБОРНИК ТЕЗИСОВ К НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ:

**«УГОЛЬНАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА В КАЗАХСТАНЕ:  
ПРОБЛЕМЫ. РЕШЕНИЯ.  
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»**



NAZARBAYEV UNIVERSITY RESEARCH AND INNOVATION SYSTEM

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «САМРУК-ЭНЕРГО»

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ

**«УГОЛЬНАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА В  
КАЗАХСТАНЕ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»**

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ВЫСТУПЛЕНИЙ

27-28 февраля 2020 года

Нур-Султан

Нур-Султан, 2020

УДК 662

ББК 65.304.13

М34

**Редакционная коллегия:**

К.А. Сулейменов, М.М. Нургалиева, Д. Туматай

**Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития»:** сборник тезисов выступлений, 27-28 февраля 2020 года, Нур-Султан / Под общей ред. д.т.н. Сулейменова К.А. – NURIS, 2020.

ISBN 978-601-332-877-5

Сборник содержит тезисы выступлений участников научно-практической конференции «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития», состоявшейся в NURIS, Назарбаев Университет, 27-28 февраля 2020 года. Конференция прошла в рамках совместного проекта NURIS и АО «Самрук-Энерго» по созданию котельных агрегатов для сжигания высокозольного Экибастузского угля и продуктов углеобогащения. В ходе конференции состоялся конструктивный обмен мнениями по актуальным направлениям развития теплоэнергетики в Казахстане, таким как технология сжигания углей, трансформация угля в продукты, мировые тенденции развития технологии сжигания твердых топлив и прочее.

Материалы конференции представляют интерес для инженерно-технических и научных работников угольной и энергетической отрасли, а также преподавателям и студентам университетов.

***Предисловие***

В сборнике тезисов Научно-практической конференции «Угольная энергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития», состоявшейся в NURIS, Назарбаев Университет, 27-28 февраля 2020 года, приведены результаты НИОКР в области твердотопливной энергетики, включая исследования по сжиганию и газификации угля с использованием различных технологий их переработки.

В работах приводятся результаты анализа текущего положения в угольной электроэнергетике Казахстана, выявлены проблемы, связанные с необходимостью обеспечения эффективного использования угля на ТЭС и проблемы, связанные с ужесточающимися требованиями к ТЭС с пылеугольным сжиганием твердого топлива в плане обязательного снижения вредных выбросов в атмосферу: летучей золы, оксидов серы и азота. Показана перспективность обогащения высокозольного Экибастузского угля со сжиганием полученного концентрата на действующих ТЭС с традиционной технологией пылеугольного сжигания, а образующиеся высокозольные отходы обогащения в котлах с топками циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Приведены результаты сжигания таких отходов, зольностью до 79%, на стендовых установках ЦКС.

Представлены результаты пуско-наладочных работ и начальной эксплуатации энергоблока мощностью 330 МВт<sub>эл</sub> с котлом ЦКС на Новочеркасской ГРЭС в России. Рассмотрены мировые тенденции развития угольной энергетики, и, в частности, перспективы развития технологии сжигания твердых топлив в ЦКС. Приведен опыт реконструкции котлоагрегатов угольных ТЭС Украины и возможные пути использования этого опыта на электростанциях Казахстана.

Приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов пиролиза, газификации и сжигания различных твердых топлив, включая биомассу на различных экспериментальных установках, в том числе, и на установках циркулирующего кипящего слоя, а также промышленных котлах. Приведены предложения по решению некоторых общих проблем ТЭС Казахстана.

*Сулейменов Калкаман Айтбаевич,*

*доктор технических наук,*

*Председатель оргкомитета конференции*

## СОДЕРЖАНИЕ

Технология сжигания углей со сниженным воздействием на окружающую среду .....	8
Результаты исследований термоокислительного пиролиза длиннопламенного угля в циркулирующем кипящем слое .....	13
Стабилизация и микрофакельное горение за удобообтекаемыми телами камеры сгорания ГТУ.....	15
Новая камера дожигания топлива для котла-утилизатора парогазовой установки .....	20
Экологически чистые и эффективные технологии пиролиза и газификации угля, ТБО, других углеродосодержащих отходов и материалов сполучением газообразных, жидких и твёрдых продуктов переработки твёрдого топлива и перспективы применения этих технологий .....	24
Повышение энергоэффективности нагнетателей ао «алэс» ТЭЦ-2 с расчетными приложениями .....	30
Вопросы интенсификации теплообмена применительно к новым конструкциям водогрейных котлов на твердом топливе .....	35
Разработка инновационных методов термической переработки тбо в модульных мусоросжигательных установках с высокой степенью улавливания вредных выбросов .....	42
Улучшение состояния окружающей среды в городе нур-султан путем перевода на газ водогрейных котлоагрегатов на ТЭЦ-2 .....	48
Мировые тенденции развития технологии сжигания твердых топлив в ЦКС. Опыт начальной эксплуатации котла с ЦКС блока мощностью 330 мвт новочеркасской грэс .....	52
Применения технологии сжигания угля в автономной водогрейной котельнойустановке с вихревой топкой .....	57
Опыт реконструкции котлоагрегатов ТЭС и ТЭЦ в Украине и возможности его использования в условиях Республики Казахстан .....	62
Получение адсорбентов на основе углей Казахстана на опытно-полупромышленной установке .....	67
Содержание элементов-примесей в золошлаковых отходах угольных месторождений Казахстана .....	73
Синтез углеродных нановолокон из каменноугольной смолы методом электроспиннинга .....	77
Технология переработки золошлаковых отходов Казахстана .....	82
Трансформация угля в продукты с высокой добавленной стоимости .....	87
Физическое моделирование и опытные испытания подземного нагрева угольного пласта .....	90
Текущее состояние и проблемы алматинских ТЭЦ .....	95
Разработка мероприятий по безмазутной растопке котлов .....	99
Применение технологии термической обработки угля для безмазутной растопки котлов .....	103
Исследование казахстанских углей на возможность извлечения летучих горючих веществ .....	107
Анализ эффективности использования биогаза в качестве альтернативного вида топлива .....	111
Технология высокоскоростного пиролиза органического сырья в установках с твердым теплоносителем по методу галотер .....	116
Анализ использования топливных брикетов в энергетических целях .....	121
Исследование улавливание диоксида серы при сжигании высокозольного экибастузского угля в циркулирующем кипящем слое .....	127
Исследование эмиссии оксидов азота в циркулирующем кипящем слое при сжигании высокозольных экибастузских углей .....	133
Экспериментальные установки лаборатории «чистые угольные технологии» Назарбаев Университет .....	139

## ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ СО СНИЖЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

**Авторы:** Алияров Б.К., Мергалимова А.К.

**Организации:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан. Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан.

В последние годы за углем закрепилось название экологически недружелюбного топлива [1]. На самом деле следует больше говорить о применяемой технологии сжигания угля, приводящей к таким показателям. В наиболее общем случае неудачной организацией процесса сжигания можно сделать любое топливо экологически менее дружелюбным к окружающей среде.

В 50-е годы прошлого столетия, приход угля в сельскую местность был, по существу революционной технологией – население было избавлено от необходимости заготавливания дров на весь отопительный период и от практически постоянного закладывания дров в печки. Этот шаг - переход на сжигание угля в те годы, возможно был более желательным и востребованным, даже относительно перехода на газовое отопление в последние годы. Появление угля «спасло» скудный лес в большинстве регионов Казахстана.

В последующем развитие тепловой энергетики происходило на основе слоевого сжигания углей в топках котлов, при котором воздействие энергетических объектов на окружающую среду было относительно незначительным (выбросы летучей золы и окислов азота и серы. Более того при пробных экспериментах со сжиганием угля в слое с заданной толщиной слоя было установлено, что уровень образования окислов азота оказался близким к уровню, который традиционно наблюдается при сжигании природного газа.

Однако стремительный рост единичной мощности котельных агрегатов потребовал перехода на пылевидное сжигание углей, которое оказалось достаточно универсально по требованиям к качеству сжигаемого угля.

Однако при пылевидном сжигании угля уровень образования окислов азота и серы в несколько раз превосходит уровень, который наблюдается при сжигании того же угля в слое. Широко применяемые устройства по связыванию окислов серы в дымовых газах пока весьма громоздки и достаточно дорогие. Многочисленные методы снижения этих выбросов пока не приводят к желательному результату [2,3,4].

Тем не менее энергия, полученная на объекте со сжиганием угля, оснащенный системой приготовления угольной пыли, с дорогими устройствами улавливания летучей золы, имеющая дорогую систему связывания окислов серы, вполне способна конкурировать с энергией на природном газе. Это означает что в большинстве стран сжигание угля в энергетике практически не имеет альтернативы.

Известно, что в угле в достаточном количестве присутствует газообразная составляющая (так называемые горючие летучие, для обычных углей от 25 до 50 процентов от массы). Последние исследования показали, что с теплотой сгорания на уровне «бедного» природного газа. Извлеченные летучие вещества угля могут подаваться в слой топлива или может сжигаться в газовой турбине. В последнем случае доля производства электрической энергии при сжигании угля может возрасти на 5-10 процентов, что обычно достигается на объектах со сжиганием природного газа с парогазовым циклом) С достаточным успехом эти летучие вещества могут быть использованы и для растопки котла и для стабилизации воспламенения угольного факела [4,5,6,7,8]. Более того, они же могут использоваться для снабжения отдаленных изолированных поселков газообразным топливом [3].

Оригинальные опыты профессора Темирбаева Д.Ж. показали, что при недостаточности кислорода в зоне выделения азотсодержащих газообразных веществ (при воспламенении угольной пыли) основная часть будущих окислов азота переходит в инертную форму и происходит заметное снижение концентрации окислов азота в дымовых газах. Более того, в результате «предварительного» извлечения части летучих горючих веществ, оставшаяся часть угля становится, как бы менее генерирующим окислы азота. Это позволяет рассматривать узел термической обработки своего рода «подавителем» образования окислов азота и только этот фактор может сделать экономически приемлемым установку этого узла в тракте движения топлива.

Этот анализ показывает, что для улучшения экологических и экономических показателей объектов, сжигающих уголь можно рассмотреть вариант совмещения слоевого и пылевидного сжигания с участием сжигания газообразных веществ [9].

В этом случае объект, сжигающий уголь может выглядеть следующим образом. На рисунке 1 представлена схема комбинированной технологии сжигания углей со сниженным воздействием на окружающую среду.

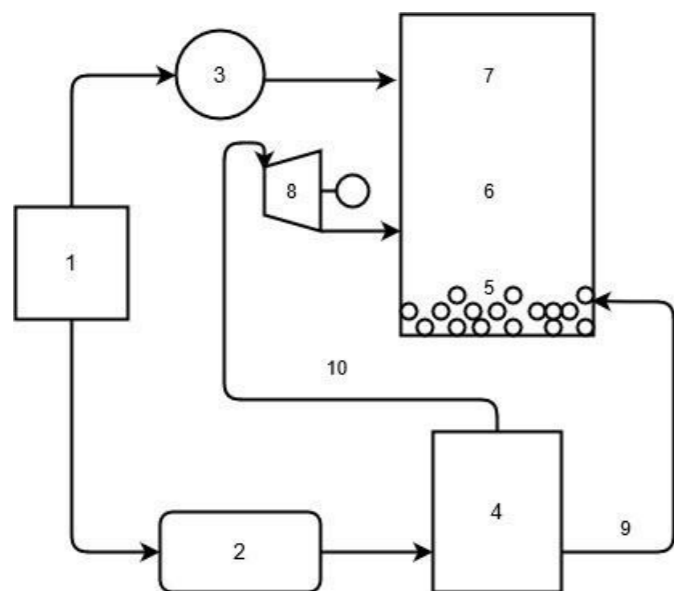


Рис. 1 – Схема комбинированной технологии сжигания угля со сниженным воздействием на окружающую среду.

1 – узел приема угля, 2 – дробильное устройство, 3 – мельница, 4 – узел термической обработки угля, 5 – зона основного сжигания топлива (в слое), 6 – зона сжигания газообразных продуктов, 7 – зона пылевидного сжигания угля для обеспечения перегрева пара, 8 – газовая турбина, 9 – подача твердых продуктов термообработки угля, 10 – подача газообразных продуктов термообработки угля.

На узле приемки поступившего угля (1) производится классификация с выделением частиц угля с размером «орех». При этом, более мелкая часть угля направляется в мельницу (3), для последующего измельчения до уровня угольной пыли. Угольные частицы с размером «орех» подаются на набор предтопок, размещаемых в нижней части топки, в которых сжигается основная часть поступившего угля. На уровень, близкий к средней радиационной части (6), в топку поступают отработанные газы газовой турбины (8) сжигающей горючие летучие, угля. На уровне, соответствующем верхней радиационной части топки (7) происходит пылевидное сжигание части от общего объема угля (обеспечить требуемый перегрев пара).

В результате выбросы летучей золы в атмосферу снизятся до уровня соответствующего уровню улавливания выше 99 % при пылевидном сжигании при используемом оборудовании со степенью улавливания 98%. Можно ожидать, что концентрация окислов азота в дымовых газах снизятся до 500 мг/м<sup>3</sup>. При

стехиометрическом добавлении в слой угля известняка и известкового «молочка» в воду, орошающую стенки скруббера, содержание окислов серы также снизятся до уровня 700 – 800 мг/м<sup>3</sup>.

В этой технологии вполне возможно некоторое возрастание потерь тепла с уходящими газами (в основном в связи с повышенным коэффициентом избытка воздуха в части сжигания газообразного вещества в газовой турбине и с высоким избытком воздуха при слоевом сжигании) и с механическим недожогом (в связи с возрастанием содержания углерода в «провале»), которые будут своеобразной платой за снижение воздействия на окружающую среду.

Эти результаты показывают, что при реализации ряда технических и технологических решений, воздействие объекта, сжигающего уголь, на окружающую среду может снизиться заметно и сделает уголь экологически приемлемым топливом.

Очевидно, что при «попытках» снижения воздействия сжигания угля на атмосферу «появляется» оптимальное значение. Для конкретизации этого вывода можно рассмотреть улавливание летучей золы. Совершенно очевидно, что по мере повышения степени улавливания золы количество золы, поступающей в атмосферу, будет уменьшаться линейно. При этом затраты на повышение степени улавливания будут расти по экспоненциальной зависимости, ориентировочно, начиная с величины 96 процентов.

Для многих стран, с относительно малой величиной плотности размещения угольных устройств, эта степень может находиться на уровне 98 процентов. Количество летучей золы, поступающей в атмосферу от предложенной технологии будет соответствовать улавливанию (при пылевидном сжигании угля) на уровне выше 99 процентов, что будет приемлемо и для развитых стран.

Если рассматривать использование возобновляемых источников энергии, то для Казахстана наиболее экономически приемлемым окажется строительство автономных миниГЭС (с установленной мощностью в несколько сотен кВт) и особенно, микроГЭС (на уровне нескольких десятков кВт) с сумарной мощностью, больше мощности всех действующих ГЭС Казахстана. При широком применении гидравлического аккумулирования энергии потоков воды, по схеме предложенной в Казахстане, привлекательность таких ГАЭС, становится бесспорной.

#### Литература:

1 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Казахстан: энергетическая безопасность, энергетическая эффективность и устойчивость развития энергетики. – Алматы: Гылым, 2010. – 277 с.

2 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание Казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных. – Алматы: Гылым, 2012. – 304 с.

3 Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К. и др. Чистые угольные технологии: теория и практика. – Караганда: «TENGRİ Ltd», 2013. – 276 с.

4 Алияров Б.К., Мергалимова А.К. О преимуществах использования газа для растопки котлоагрегатов // Материалы I международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017. – С. 6-10.

5 Пат. 2450. Способ безмазутной растопки котлоагрегатов / Алияров Б.К., Мергалимова А.К.; опубл.30.10.2017, Бюл.№20.

6 Алияров Б.К., Мергалимова А.К. На ТЭС и котельных мазут или сжатый газ? // Матер. IV Междунар. науч. - практ. конф., посвященная 20 - летию Евразийского национального университета им Л.Н. Гумилева «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения». – Астана, 2016. – С. 43-46.

7 Обоснование перспектив применения инновационных технологий комплексной и глубокой переработки углей в Приморском крае АНО «Центр стратегических исследований топливно-энергетического комплекса дальнего востока». - 2013

8 Aliyarov B., Mergalimova A., Zhalmagambetova U. Application of coal thermal treatment technology for oil-free firing of boilers // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2018. - Vol 2. – P. 45-54.

9. Стырикович М.А., Катовская К.Я., Серов Е.П. Котельные установки М-Л.1959 с 86

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОГО ПИРОЛИЗА ДЛИННОПЛАМЕННОГО УГЛЯ В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

**Авторы:** Сулейменов К.А., Дюсеханов Т.К.

**Организация:** ТОО «Научно-исследовательский инжиниринговый центр ERG», г. Нур-Султан, Казахстан.

В настоящее время полукоксы в основном получают с использованием слоевой технологии, обладающей рядом недостатков, таких как: образование фенольных соединений; высокая влажность получаемого полукокса (18-22%); неравномерность термообработки угля – встречается полукоксы с содержанием летучих выше 5%, что нежелательно; необходимость использования фракционированного угля, например, 20-80 мм и отсева мелкодисперсного угля 0-20 мм, имеющего, существенно меньшую стоимость и незначительный по объему рынок, сбыта.

Развитие новых технологий производства металлов потребовало применения в качестве восстановителей мелкодисперсного полукокса размером 0-10 мм. В связи с этим использование отсева фракцией 0-20 мм может существенно снизить стоимость производимого кокса. Поэтому разработка новой технологии получения относительно дешевого мелкодисперсного полукокса из отсева угля и решение ряда недостатков, присущих слоевой технологии, является актуальным.

ТОО «Научно-исследовательским инжиниринговым центром ERG» предложена новая технология получения спецкокса – термоокислительный пиролиз угля в циркулирующем кипящем слое – ЦКС, которая защищена патентом / Евразийский патент №025090 от 23.04.2013 «Способ переработки угля». Сулейменов К.А., Дюсеханов Т.К. и другие/. Данная технология предполагает получение полукокса в топочном контуре технологического реактора ЦКС при этом образующиеся генераторные газы и вынесенные из технологического цикла мелкие частицы готового продукта – полукокса, а также недообработанные частицы угля без охлаждения подаются в горелки котлов для дожига и производства тепловой энергии, используемой далее для производства электроэнергии или теплоснабжения.

Реализуемость данной технологии в целом была подтверждена разработанной расчетно-аналитической моделью технологии получения полукокса в газификаторе ЦКС с выработкой электроэнергии в паротурбинном цикле.

Для экспериментальной проверки предлагаемой технологии ТОО «НИИЦ ERG» была создана лабораторная установка газификатор-пиролизер ЦКС с расходом топлива

50-70 кг/час. Установка состоит из топки (внутренний диаметр 150 мм, высота 5,6 м), технологического циклона, стояка, пневмомеханического циклона и перепускных патрубков, изготовленных из жаропрочной стали и теплоизолированных для обеспечения минимальных потерь тепла в окружающую среду. Уголь в топку подается пневмотранспортом, готовый полукокс выводится из трех точек топчного контура водоохлаждаемыми шнеками-дозаторами. Воздух в топку и другие узлы установки подается воздуходувкой. Образующиеся генераторные газы и мелкие коксозольные частицы после циклонов дожигаются в камере дожигания, далее охлаждаются в охладителе газа и после очистки в рукавном фильтре дымососом отводятся в дымовую трубу и сбрасываются в атмосферу.

Исследовался шубаркольский уголь влажностью  $W^t=10,6\%$ , зольностью  $A^d=4,25\%$ , содержанием летучих  $V^{daf}=44,5\%$  и калорийностью  $Q^H_p=6335$  ккал/кг в температурном диапазоне 750-1000°C. Избыток воздуха с учетом первичного и вторичного воздуха изменялся в пределах 0,2-0,35. Температура слоя при постоянной форсировке слоя регулировалась за счет изменения избытка воздуха на поданное топливо, а при постоянном избытке воздуха за счет изменения форсировки слоя. При большей форсировке – температура слоя выше.

Проведенные опыты показали реализуемость данной технологии. При температурах слоя свыше 850°C содержание летучих в получаемом полукоксе не превышает 4-5%, а влажность выводимого из цикла полукокса не выше 1%.

Вывод готового полукокса из объема топки устанавливался при расходе поддерживающим определенную высоту пузырькового слоя (по перепаду давления), а вывод циркулирующего материала определялся по перепаду давления в надслоевом пространстве (концентрации частиц, кратность циркуляции). Необходимо выдерживать минимально допустимую кратность циркуляции, при которой получается максимальный выход готового продукта и, соответственно, меньший расход электроэнергии на дутье, а полученный полукокс соответствует всем необходимым требованиям по качеству. Так при концентрации частиц в верхней части топки равной 13 кг/м<sup>3</sup>, выход полукокса из циркулирующей массы составлял 16 кг/час, а при 25 кг/м<sup>3</sup> – выход сократился до 11 кг/час. При этом качество полукокса практически не изменилось.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ И МИКРОФАКЕЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ ЗА УДОБООБТЕКАЕМЫМИ ТЕЛАМИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ

**Автор:** Катранова Г. С.

**Организация:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Обеспечение стабильного горения при различных избытках воздуха является одной из важных проблем камер сгорания газотурбинных установок. Стабилизация пламени обеспечивается различными способами: к ним относятся закрутка топлива в горелочном устройстве, создание рециркуляционной зоны за плохообтекаемыми телами и комбинация двух способов. Особый интерес представляет изучение стабилизации при микрофакельном горении топлива.

Принцип работы микрофакельных устройств заключается в распределении факелов по сечению и объему на более мелкие. Такой принцип обеспечивает высокую степень сжигания топлива, хорошую стабилизацию при тех же средних температурах в зоне горения жаровой трубы. Устройства на базе хорошообтекаемых (удобообтекаемых) тел имеют высокий потенциал в виду малых гидравлических сопротивлений [1].

В статье [2] рассматривалось влияние коэффициента избытка топлива  $\phi$  (избытка воздуха  $\alpha$ ) на концентрацию оксидов азота и недожога топлива при использовании турбинных профилей с накладками. Исследование показало, что турбинные профили являются хорошими стабилизаторами с достаточно высокими показателями горения, в первую очередь низким недожогом топлива. Также было показано, что профили имеют достаточно широкий диапазон стабилизации при  $\phi=0,2\div 2,3$  ( $\alpha=5\div 0,43$ ).

При исследовании использовалась программа ANSYS Fluent. При построении моделей было предложено, что топливо будет поступать на широкую часть (спинку) турбинного профиля. В данной статье рассмотрены три способа подачи топлива, представленные на рисунке 1. Проведенные экспериментальные исследования на угольных стабилизаторах показывали [3], что способ подачи топлива играет значительную роль в формировании рециркуляционной зоны, соответственно и обеспечении стабилизации пламени.

Исходя из этого, были рассмотрены три варианта подачи топлива. В первом варианте топливо подается на широкую сторону (спинку) профиля, во втором варианте топливо распыляется непосредственно в рециркуляционную зону образующуюся между накладкой и профилей, в третьем варианте топливо распылялось со спинки.

Область моделирования состоит из трех профилей лопаток, причем все профили участвуют в процессе горения. Профили снабжены регулируемы (в данной статье регулировка не рассматривалась) накладками, угол которых был равен  $45^{\circ}$  от касательной к выпуклой (спинке) стороне профиля. Угол был выбран исходя из прошлых результатов моделирования и [2,3]. Начальные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные параметры

Расход топлива, кг/ч	Скорость воздуха, м/с (бралась согласно экспериментальной установке)	$\phi$ , коэффициент избытка топлива по [1]	Начальная температура окислителя (воздуха)/топлива, К	Количество тетраэдрических элементов в моделируемой области
1	10	0,06	300	200000

При моделировании использовалась модель турбулентности k- $\epsilon$  realizable, которая является наиболее оптимальным решением.

В виду того, что в статье рассматривалось лишь влияние подачи топлива, при моделировании скорость и значение расхода топлива не изменялись.

На рисунке 1 представлены рассмотренные варианты подачи топлива. В первом варианте (а) топливо подается на широкую сторону профиля, во втором варианте (б) топливо распыляется непосредственно в рециркуляционную зону, образующуюся между накладкой и профилем, в третьем варианте (в) топливо распылялось с выпуклой (спинки) части профиля.

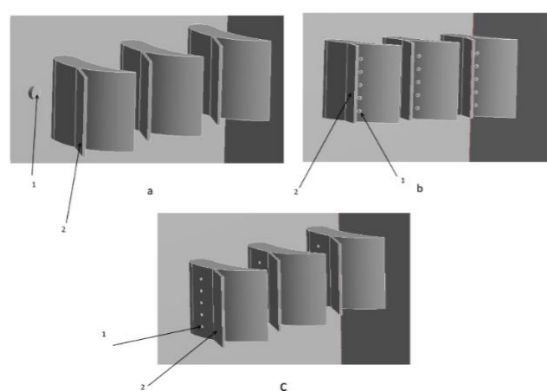


Рисунок 1 – Варианты подачи топлива

а – на турбинный профиль, б – в рециркуляционную зону, с – со спинки профиля

1 – сопла, 2 - накладка

Анализ полученных результатов показал следующее:

Температура. Контурные температуры в зависимости от вариантов подачи топлива представлены на рисунке 2. При подаче топлива на турбинный профиль (вариант «а») имеется высокотемпературная зона, образующая за турбинным профилем, где сгорает основная часть топлива, причем по сравнению с другими вариантами подачи топлива, температура выше. Наименьшие температуры наблюдаются при подаче топлива со спинки турбинного профиля (вариант «с»), ввиду того, что топливо реагирует раньше с окислителем, чем в других вариантах, соответственно выгорая раньше. Заметно, что правый профиль подвержен наиболее высоким температурам (вариант «а»). Это происходит за счет того, что с левой стороны профиля нет возмущений. При подаче в зону рециркуляции сама зона рециркуляции выталкивается из внутреннего пространства между накладкой и профилем за счет дополнительно создаваемой силы потока топлива. Из рисунка можно сделать вывод, что при вариантах «а» и «с» имеется максимальная температурная нагрузка на накладку, а при варианте «б» она несколько ниже в виду того, что высокотемпературная зона находится лишь с одной стороны.

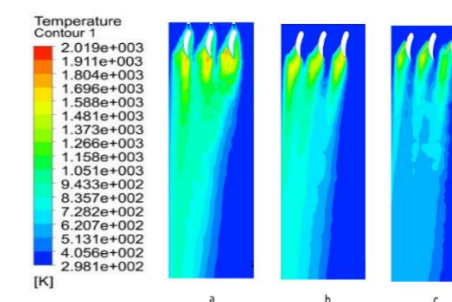


Рисунок 2 – Температурные контуры в зависимости от варианта избытка подачи топлива

а – варианта подачи на профиль, б – вариант подачи в пространство между профилем и накладкой, с – вариант подачи со спинки

Таблица 2 – Результаты численного моделирования

Вариант подачи топлива	а	б	с
Концентрация NOx, ppm	6,8	3,5	1,3
Температура на выходе из моделируемой области, К	358	360	358
Концентрация топлива на выходе, г/м <sup>3</sup>	0,058	0,059	0,056
Осевая скорость на выходе, м/с	11,8	12	11,93

Температура на выходе. В таблице 2 представлены температуры на выходе из моделируемой области. Как видно из результатов, значительного влияния на температуру газов подача топлива не оказывает.

Недожог топлива. Недожог топлива анализировался исходя из концентрации топлива на выходе из моделируемой области. Видно, что разность концентраций топлива на выходе из моделируемой области находится в пределах погрешности.

Концентрация оксидов азота (NO<sub>x</sub>). Наиболее интересным выглядят результаты концентрации оксидов азота на выходе из моделируемой области. Как видно из таблицы 2, концентрация топлива максимальна при варианте подачи «а». Это объясняется тем, что топливо с воздухом достаточно поздно смешивается, по сравнению с другими вариантами. Поэтому концентрация топлива в рециркуляционной зоне достаточно высока, что также можно видеть на рисунке 2 по высоким температурам варианта «а». Непосредственная подача топлива в зону рециркуляции снижает концентрацию оксидов азота за счет более равномерной подачи топлива (см. рисунок 1). Очевидно, что дробление потока топлива на более мелкие приводит к более быстрому выгоранию, и снижению локальной температуры, которая является основным источником образования оксидов азота.

Вариант «с» является наиболее приемлемым с точки зрения снижения оксидов азота. Равномерная подача топлива вдоль спинки профиля приводит к смешению и горению топлива до зоны рециркуляции, что снижает его концентрацию. Снижение концентрации топлива в зоне рециркуляции приводит к снижению температуры, соответственно и образованию оксидов азота.

Выводы: Исследования показали, что турбинные профили могут служить в качестве микрофакельных устройств при формировании фронтального устройства камер сгорания газотурбинных двигателей, обеспечивая устойчивость стабилизации пламени и низкие выбросы NO<sub>x</sub>.

#### Литература:

1. Достияров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методика их расчета. Диссертация на соискание степени доктора технических наук, Алматы, 2000 г.

2. A.M. Dostiyarov, D.R. Umyshev and G.S. Katranova. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 274(2019) 012144 doi: 10.1088/1755-1315/274/1/012144. Numerical modeling of the influence of different options for feeding fuel on the combustion process for turbine profiles.

3. Умышев Д.Р. Разработка и исследование камеры сгорания ГТУ с пониженным образованием токсичных веществ. Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD), Алматы, 2017 г.

## НОВАЯ КАМЕРА ДОЖИГАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПАРОВАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

**Автор:** Ожикенова Ж.Ф.

**Организация:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

В связи с изменением климата мира и непредсказуемости погоды в дальнейшем понадобится во всех котлах тепловой электрической станции ставить камеры дожигания, особенно в котле-утилизаторе парогазовой установки (КУ ПГУ). Камера дожигания КУ в наисильнейшие морозы покрывает пиковые тепловые и электрические нагрузки, обеспечивая долгосрочную и нужную работу в разных обстоятельствах. А использование ПГУ в качестве энергетического оборудования увеличивает КПД станций до 60% [1], что является весьма актуальным. Причем камеры дожигания топлива должны отвечать современным жесточайшим требованиям по экологии. Во-первых, полнота сгорания топлива должна быть высокой при устойчивом горении и при высоких скоростях набегающего забалластированного потока выходных газов газотурбинной установки (ГТУ). Во вторых необходимо создание равномерного температурного поля после горелок. В третьих нужно добиться высоких экологических показателей, т.е. достичь минимальных уровней оксида азота. Вышеуказанных требований можно добиться за счет установки в переходном газоходе КУ угольных диффузионно-стабилизаторных горелок, причем обеспечивая их эшелонирование.

Ранее было известно КУ ПГУ, изобретенной А.Г. Тумановским, содержащее газоход, подключенный к трактам подачи воздуха и продуктов сгорания, установленную поперек газохода решетку, состоящую из стабилизаторов, над каждым из которых установлен топливораздающий перфорированный коллектор с топливоподводящей трубкой внутри, имеющей отверстие в стенке. Данный КУ ПГУ позволяет повысить качество сжигания топлива и улучшить смесеобразование, однако имеет ряд недостатков.

В связи с этим мы предлагаем котел-утилизатор с простой конструкцией, с низким выходом оксидов азота и эффективным обезвреживанием дымовых газов. Изобретение позволяет повысить качество сжигания топлива, в связи с использованием микрофакельных горелок, а также изобретение влияет на экономичность и эффективность процесса так, как горелочные устройства находятся в начальной части КУ. При работе котла-утилизатора имеет возможность регулирования рециркуляцией газов. Угольные стабилизаторы, используемые в КУ, обеспечивают минимальные уровни оксидов азота в ПГУ, высокую интенсивность процесса смесеобразования при малой длине факела.

Поэтому, это позволяет создать равномерное поле по сечению КУ, что положительно влияет на работу КУ. В работе [2] исследовалось 12 разных вариантов стабилизаторов, в том числе проволочные сетки, перфорированные пластины, конусы и желоба и оказалось, что чем больше потери давления, тем выше генерируемый при этом уровень турбулентности и тем ниже выбросы  $NO_x$ .

Предлагаемый нами КУ ПГУ состоит из ГТД 1 с турбогенератором 2 и паровой котел-утилизатор 3 с угольными стабилизаторами 4. Паровой котел-утилизатор содержит последовательно расположенные пароперегревательный и испарительный участки 5 и 6. Согласно изобретению, угольные стабилизаторы 4 размещены на входе в КУ 3. Здесь КУ выполнен вертикальным и содержит барабан 8 с циркуляционным насосом 9, экономайзер 10 с регулирующим клапаном (РК) 11, экономайзер 10. В приведенном примере КУ 3 также имеет хвостовой экономайзер 13, установленный по ходу газов за экономайзером 10 и содержит водяной подогреватель сетевой воды 14 с выходом и входом – через циркуляционный насос 15 и регулирующий клапан 16.

В котле утилизаторе 3 в качестве теплоизоляции и теплозащиты стенок в области горения существует защитный кожух из жаростойкой стали 17, на котором параллельно друг к другу сварены воздушный и топливоподающий коллектор 18 и 19. Коллекторы перпендикулярно соединены со эшелонированными стабилизаторами 4. Стабилизатор состоит из воздухораздающей трубы 20 с зазорами 23 в стенке и внутри него топливораздающей трубы 21 с отверстием 22. Здесь в качестве окислителя используется отходящие газы 7 после газовой турбины и воздух, подаваемые в трубу 20. Стабилизатор 4 с воздухоподающей трубой 20 соединен точечной сваркой [3].

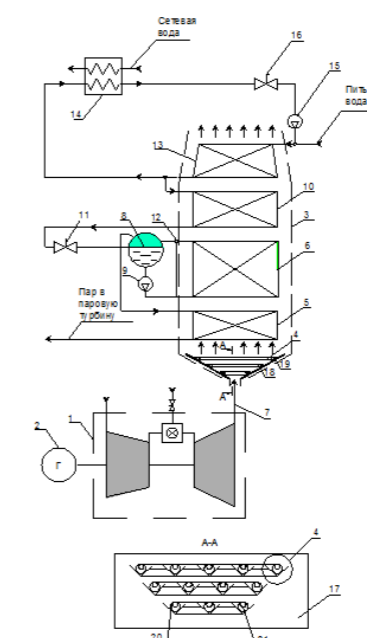


Рисунок -1. Продольный вид КУ ПГУ с угольными стабилизаторами

Преимуществом котла-утилизатора, помимо вышесказанного, является использование микрофакельных угольных горелок, который способствует снижению образования окислов азота.

Угольные стабилизаторы при отдельной подаче топлива и окислителя, являются мощными турбулизаторами всего потока, поэтому за ними, наряду с интенсивным горением, происходит также интенсивное перемешивание продуктов сгорания с подаваемым в камеру сгорания избыточным воздухом, что делает малым время пребывания газов в зоне относительно высоких температур. В результате совокупного влияния гомогенизации смеси, снижения температуры в зоне горения и уменьшения времени пребывания газов в зоне высоких температур, камеры сгорания с угольными стабилизаторами, несмотря на свою конструктивную простоту, могут иметь очень низкую эмиссию оксидов азота.

Вследствие высокой интенсивности массообмена, горение за стабилизатором, несмотря на отдельную подачу компонентов, происходит в режиме, близком к турбулентному горению готовых горючих смесей, что является одним из условий уменьшения сажеобразования и эмиссии токсичных продуктов недожога. По этой же причине факел за стабилизатором имеет малую протяженность по потоку и высокую теплонапряженность [4].

Изучение образования вредных веществ при использовании различных плохообтекаемых тел [5] показали, что плохообтекаемые тела в виде уголков позволяют значительно сократить образование вредных веществ, а также значительно повысить стабильность горения.

Новая камера дожигания с угольными стабилизаторами в котле-утилизаторе будет иметь низкие содержания оксидов азота, не более 25 ppm.

#### Литература:

1. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 587с.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566с.
3. Заявка на патент РК №2019/0859.1, от 24.11.2019. Горелочное устройство котла-утилизатора парогазовой установки // Достияров А.М., Ожикенова Ж.Ф., Наурыз Б.К.

4. Умышев Д.Р. Разработка и исследование камеры сгорания ГТУ с пониженным образованием токсичных веществ: дис. док. фил.: г.Алматы: Алматинский Университет энергетики и связи им. Г. Ж. Даукеева, 2017. - 139с.
5. Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tyutebayeva G.M. Experimental investigation of the management of NO<sub>x</sub> emissions and their dependence on different types of fuel supply// Espacios. – 2017, Vol.38, №24. –P.17.

**ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПИРОЛИЗА И  
ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ, ТБО, ДРУГИХ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ И  
МАТЕРИАЛОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ  
ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ПРИМЕНЕНИЯ ЭТИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Авторы:** С.Б. Садыкова, Н.Р. Картджанов

**Организации:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилёва. г. Нур-Султан, Казахстан.

Дефицит первичных энергоресурсов и постоянно растущий спрос на энергию будут требовать замены природного газа и нефти другими энергоносителями во все возрастающем объеме. В условиях непрерывной борьбы за повышение надежности энергоснабжения, переработка угля в газообразный энергоноситель приобретет решающее значение уже в недалеком будущем.

Процессом преобразования твердых или жидких топлив в газообразные продукты путем неполного окисления в условиях высоких температур называется газификация. Газификация угля – не новая технология, в середине XX века в ряде стран действовали промышленные установки.

Технология газификации угля имеет стратегическое значение для Казахстана, поскольку в нашей стране общие геологические запасы угля составляют примерно 150-160 млрд. т. Из них 62 % бурые угли, а 38 % каменные угли. В настоящее время существуют разные методы процессов газификации. Но почти что во всех из них продуктами газификации являются бурые угли.

Газ, полученный при газификации угля, в будущем может найти применение, прежде всего, для производства:

- заменителя природного газа (ЗПГ);
- синтез-газа для химической промышленности;
- топливных газов для технологического и энергетического сжигания;
- восстановительного газа для металлургических целей, например для прямого восстановления железной руды.

В качестве сырья для процесса газификации из Казахстанских месторождений уголь Шубаркольского разреза имеет высокий потенциал. Это связано с тем, что

Шубаркольский уголь обладает высоким выходом летучих (около 38%) и относительно низкой зольностью (до 6%).

Технологии газификаций, которые испытаны в промышленном масштабе - это процесс Лурги; процесс Винклера, процесс Копперс-Тотцека и др. Основными горючими компонентами синтез-газа получаемых во всех этих процессах являются  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ . А теплота сгорания синтез-газа в зависимости от сырья и технологий варьирует в интервале от 5 до 13 МДж/м<sup>3</sup>. То есть синтез-газ относится к классу низкокалорийных топлив.

Известно, что низкокалорийные топлива невозможно сжигать в традиционных горелочных устройствах. Так как такие топлива обладают ухудшенным концентрационным пределом воспламеняемости, из-за чего снижается стабильность факела, повышаются продукты химического и механического недожога и срыв факела. Поэтому разработка новых устройств, для сжигания синтез-газов является актуальным аспектом.

Авторы для эффективного сжигания синтез-газов предлагают конструкцию микромодульной воздушной форсунки (ММВФ), схема которой представлена на рис.1. ММВФ содержит наружный цилиндрический обвод. На входе которой установлен завихритель воздуха с углом лопаток  $\beta=40^\circ$  и трубка подачи топлива. На выходе из цилиндра одной оси последовательно установлены два регистра с шагом  $t$  и углом  $\beta$   $30^\circ$  и  $20^\circ$  соответственно.

Специальная конструкция горелки состоит из нескольких зон: зона предварительной подготовки обедненной смеси; двух последовательных завихрителей и зона горения (на выходе из ММВФ). Часть воздуха через входной регистр поступает закрученным потоком в первую зону, где смешивается с синтез-газом образуя «обедненную» топливо воздушную смесь (ТВС). Этот форсуночный воздух подводится в количестве меньше необходимого для начала воспламенения топлива. Далее обедненная смесь проходит через первые завихрительные лопатки для гомогенизации смеси и интенсификации массообмена. После первого завихрителя гомогенная смесь через второй завихритель закрученным потоком поступает в камеру сгорания, где интенсивно смешиваясь с основным потоком воздуха, начинает гореть.

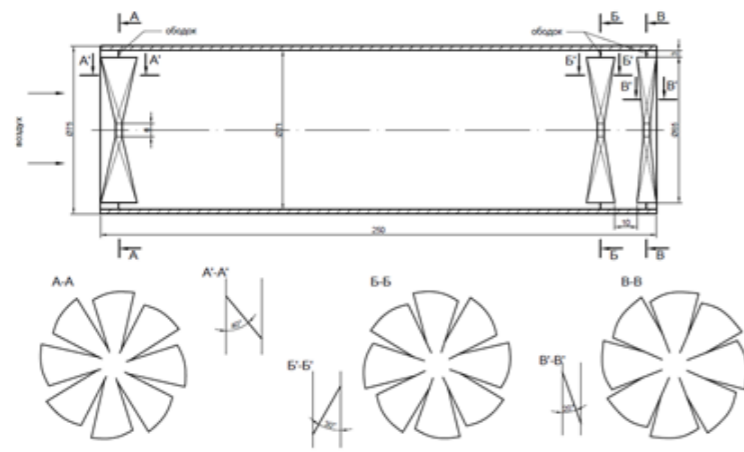


Рисунок 1 – ММВФ с входным и выходным, а также внутренним завихрителями

Последовательное расположение двух завихрительных лопаток на выходе из ММВФ предотвращает проскок факела в зону обедненной смеси и срыв факела. А также их правильное расположение обеспечит изменение турбулентности и газодинамическую саморегуляцию при изменении производительности.

При сжигании синтез-газов предварительная подготовка топлива играет определяющую роль для устойчивости факела. Поэтому в конструкции ММВФ предварительное смешивание синтез-газа и окислителя с получением ТВС исключает срыв факела и обеспечит устойчивость горения. А эффективность смешивания и образования ТВС является функцией от турбулентности потока. Турбулентный поток характеризуется неупорядоченным движением частиц газа, при котором скорость в каждой точке потока меняется по направлению и по величине. Для турбулентного потока характерно наличие пульсаций скорости, давления, температуры и концентрации вещества. Молекулярный механизм передачи массы вещества интенсифицируется пульсациями и перемешиваниями отдельных объемов смеси.

Для определения эффективного угла установки входного завихрителя, который определяет интенсивное смешивание топлива и окислителя, авторами были проведены экспериментальные исследования интенсивности турбулентности изотермического потока внутри микромодуля при различных углах установки лопаток.

Измерение интенсивности турбулентности  $\epsilon$  проводились термоанемометрическим методом в микромодулях с диаметром  $D_{\text{вн}}=46$  мм и длиной канала 150 мм, углы лопаток:  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $60^\circ$ . Точки замера по поперечному сечению с шагом 10 мм и по продольному сечению на калибрах 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,82. Результаты представлены на рис. 2.

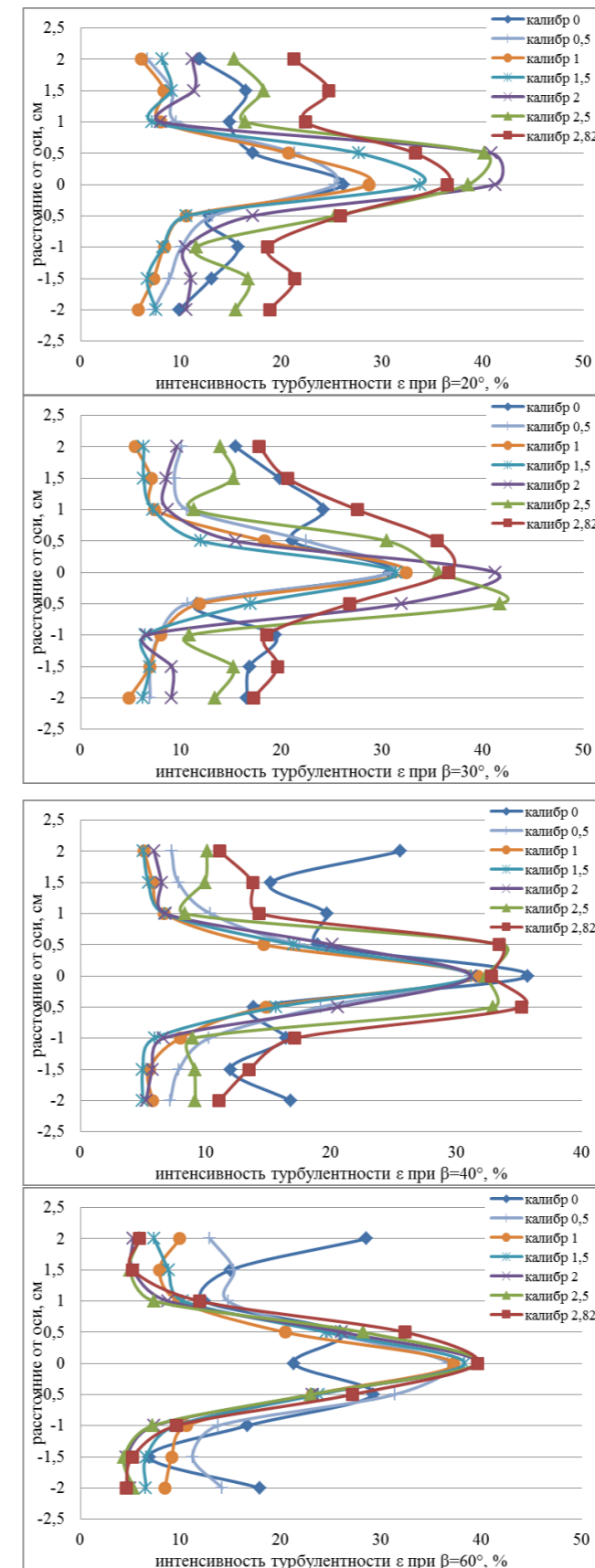


Рисунок 2 – Интенсивность турбулентности в различных углах установки завихрителей

Анализ данных по изотермическому потоку демонстрирует, что максимальное значение интенсивность турбулентности имеет место в центре ММВФ по оси во всех углах установки завихрителей. А в разрезе поперечного сечения ММВФ интенсивность

уменьшается от центра к стенке. Это объясняется тем, что при закрученном потоке из-за центробежных сил поток концентрируется на периферии и в центре ММВФ образуется зона с пониженной средней скоростью. Так как интенсивность характеризуется пульсациями средней скорости, набегающие потоки от центра к периферии и, наоборот, в центре создают высокие пульсации. К тому же интенсивность турбулентности обратна пропорциональна средней скорости потока. Поэтому слой, который на периферии имеет высокую среднюю скорость, обладает более низкой интенсивностью турбулентности по сравнению с центром (рис.2).

Также средняя  $\varepsilon$  по продольному сечению повышается к выходу ММВФ, что показывают точки замеров на различных калибрах. Топливо обычно подается ближе к входному регистру ММВФ – приблизительно на расстоянии до одного калибра (46 мм). Поэтому турбулентность в этой зоне будет играть определяющую роль для формирования топливно-воздушной смеси (ТВС).

На интенсивность турбулентности влияет угол установки лопаток завихрителей. Из графика, при  $\beta=20^\circ$   $\varepsilon$  в центре микромодуля при калибрах 0; 0,5; 1 составляет 25-28 % и снижается по направлению к стенке канала до 5%. При  $\beta=30^\circ$  диапазон интенсивности турбулентности на тех же точках достигает 30-32%. На периферии варьирует в интервале от 4,79 до 10 % (рис.2).

С ростом угла установки  $\beta$  лопаток завихрителей на оси микромодуля  $\varepsilon$  растет, при  $\beta=40^\circ$  и  $\beta=60^\circ$  средняя  $\varepsilon$  в центре составляет 34% и 37% соответственно. На перифериях замечается увеличение слоя с равномерным полем интенсивности турбулентности. Также при  $\beta \geq 40^\circ$  наблюдается относительно равномерная турбулентность на начальных калибрах, по сравнению с углом  $\beta \leq 40^\circ$ . Это объясняется тем, что при низких углах установки завихрителей идет сильная радиальная закрутка потока и снижение осевой составляющей скорости потока (рис.2).

Из вышеизложенного вытекает, что оптимальный угол установки лопаток регистров  $\beta \geq 40^\circ$ . Из-за того, что по оси ММВФ интенсивность турбулентности максимальная, для создания топливно-воздушной смеси целесообразнее будет подавать синтез-газ в зону от 0,5 до 1 калибра. Направление подачи синтез-газа рекомендуется от центра к периферии, так как основной поток воздуха сконцентрирован вблизи стенки ММВФ. Также большие углы установки лопаток регистров обеспечивают безударное обтекание лопаток воздушным потоком, что снижает аэродинамическое сопротивление ММВФ.

Для обеспечения энергетической безопасности Казахстана и диверсификации топливно-энергетических ресурсов страны, газификация углей и использование синтез-газа является перспективным направлением. Но для развития такого сценария, топливо

сжигающие установки и устройства должны быть готовыми. Поэтому разработка и исследование устройств и установок для сжигания синтез-газов имеет большое значение для энергетического комплекса.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАГНЕТАТЕЛЕЙ АО «АЛЭС» ТЭЦ-2 С РАСЧЕТНЫМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ

**Авторы:** Каирлин А.М., Борисова Н.Г.

**Организация:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Энергосбережение, снижение энергоемкости экономики и повышение эффективности использования энергоносителей являются важнейшим стратегическим направлением нашей страны.

Снижение расхода энергии на собственные нужды (СН) станции является актуальным направлением проектных решений. В частности, оно обеспечивается за счет исключения дросселирования по пароводяным и газоздушным трактам и перехода к регулированию производительности большого количества насосных и вентиляторных установок с помощью электроприводов с переменной (регулируемой) частотой вращения (рис.1).

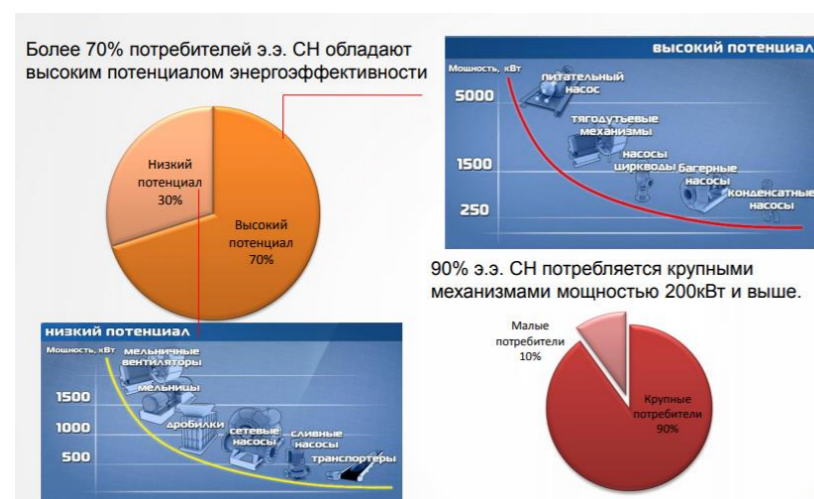


Рисунок 1 - Потенциал энергоэффективности основных потребителей электроэнергии СН

Цель исследования - повышение энергоэффективности нагнетателей АлЭС ТЭЦ -2 и прогнозирование экономии энергии на примере насосного парка станции, с разработкой программного продукта для выполнения специальных технических расчетов ТЭС.

На основании расчета тепловой схемы АлЭС ТЭЦ-2 и при анализе энергопотребления основным и вспомогательным оборудованием станции, сделан вывод о применении частотно-регулируемый привод (ЧРП) для насосов турбинного цеха.

При стремлении к минимизации затрат на внедрение регулируемого электропривода в рамках технологического перевооружения и реконструкции на действующих ТЭС необходимо обратить внимание на два важных обстоятельства[1,3]: □

- возможность сохранения в работе уже установленных на ТЭС электродвигателей, дополняя их устройствами регулирования - преобразователями частоты и средствами автоматизации; □

- возможность размещения оборудования преобразователей частоты в имеющихся помещениях ТЭС. Последнее обстоятельство однозначно диктует выбор оборудования с минимальными габаритными показателями.

В 2015 году компания «Siemens» вместе с казахстанскими партнерами провела реконструкцию и расширение Алматинской ТЭЦ-2 АО «АлЭС», применив высоковольтные преобразователи частоты ROBICON «Сименс» в сетевых насосах 1 подъема и насосов подпитки теплосети [2].

Анализ режима работы насосных установок выполняется с использованием характеристик насосов и трубопроводов. Насос может работать наиболее экономично, если его подача и напор соответствуют максимальному значению КПД. Вместе с тем допускается некоторое отклонение рабочих параметров этих насосов от значений, указанных в каталогах. Однако они при этом не должны выходить за пределы рекомендуемых подач насоса. За этими пределами насосы работают с низкими значениями КПД, при этом возможна перегрузка насосного агрегата, а также существует опасность возникновения кавитации и помпажа.

При оснащении насосных агрегатов регулируемым электроприводом необходимо обращать внимание не только на экономию энергии, но и обеспечение нормального режима работы насосного агрегата.

Для обеспечения нормальной работы насоса следует анализировать прогнозируемые режимы работы насосов на пониженных частотах вращения, оговаривая в технологических требованиях к САУ необходимость удержания рабочей точки в рабочем диапазоне при возможных изменениях частоты вращения [1].

Решение поставленных задач, в частности, апробация созданной модели и программного продукта достигаются в среде разработки MS Visual Studio. С помощью созданного приложения «EneSaveCalc» определены характеристики насоса Д630-90 насосного парка турбинного цеха АлЭС ТЭЦ 2, потребление электроэнергии его приводом, а также прогнозируемая экономия энергии при установке ЧРП в разработанном программном продукте (рис.2)

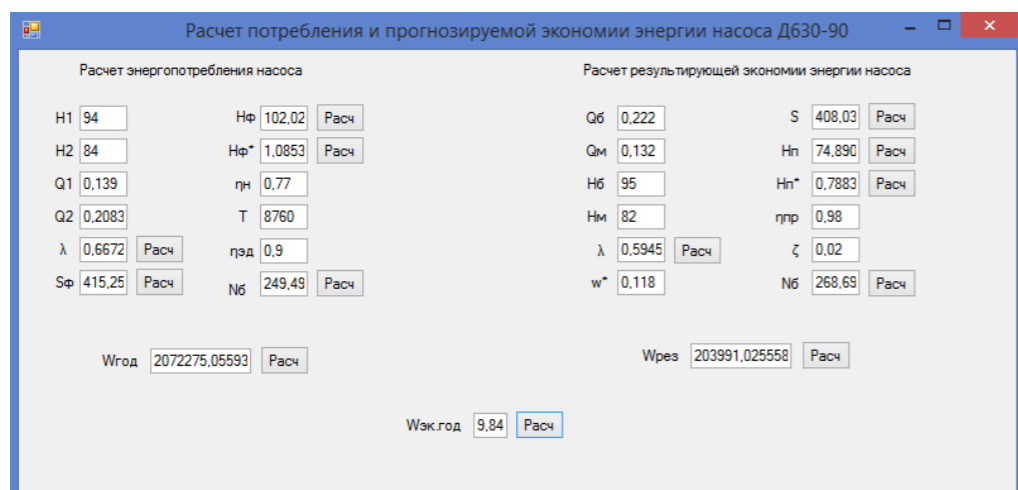


Рисунок 2 – Окно EneSaveCalc, программного продукта расчета потребления и экономии энергии насоса Д 630-90 насосного парка ТЦ АлЭС ТЭЦ 2, выполненного в MS Visual Studio при помощи языка C#, дополненного Windows Form.

Таким образом, при установке ЧРП в год будет сэкономлено 203991 кВтч, что составляет около 10% потребляемой электроэнергии.

Полагая, что частотно-регулируемым приводом оснащается один насосный агрегат и в приводе используется частотный преобразователь компании «Hyundai» серии 2500HF мощностью 250 кВт, оценивается экономическая целесообразность внедрения ЧРП.

Дополнительные капитальные затраты, складывающиеся из стоимости преобразователя и стоимости строительно-монтажных работ, составляют 3,75 млн. тенге. В рассматриваемой насосной установке создание энергосберегающей САУ на основе применения частотно-регулируемого электропривода компании «Hyundai» серии 2500HF окупается в достаточно разумные сроки  $T_{ок} = 1,9$  года, даже без учёта экономии воды, т. е. применение частотно-регулируемого электропривода в данной установке следует считать вполне эффективным.

Данное приложение планируется использовать на всем насосном парке ТЭЦ-2. Следующим этапом будет разработка аналогичного программного продукта для расчета прогнозируемой энергоэффективности тягодутьевых механизмов.

С учетом предстоящей масштабной реконструкции ТЭЦ-2 актуальность работы возрастает.

В рамках стажировки в Национальном Технологическом Институте «Сендайский Колледж» (National Institute of Technology, Sendai College) был исследован робот Трайал (Trial), обеспечивающий регулирование числа оборотов двигателей (рис. 3).

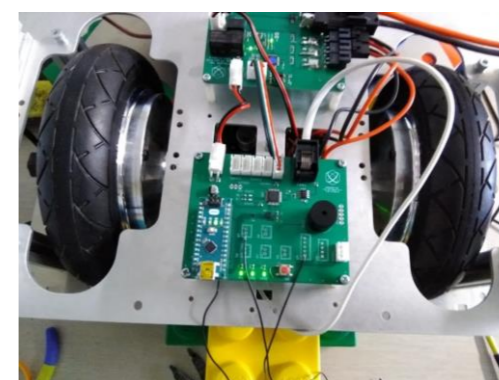


Рисунок 3 – Робот Trial

Trial - это робот, который оснащен двумя мотор-колесами, каждый мощностью 250 Вт, которые питаются от литий-ионного аккумулятора. Для каждого мотора есть драйвер, а также один для аккумулятора. Руководящий орган - Arduino Nano. Для управления используются код со своими библиотеками, кнопка питания и аварийная кнопка. Несмотря на тип двигателя, отличный от тех, которые установлены на насосах, принцип действия весьма схож. Преобразователь частоты уже встроен в Трайал, задается его библиотеками (рис. 4).

```
31 void loop() {
32   if (digitalRead(2) == 0) {
33     robot.writeMotorDir(0, 1);
34     robot.writeMotorDir(1, 1);
35     robot.writeMotorDir(0, 0);
36     robot.writeMotorDir(1, 0);
37     robot.writeMotorRun(2, true);
38     robot.writeSpeedRef(0, 100, 40);
39     robot.writeSpeedRef(1, 100, 40);
40     delay(600);
41     robot.writeSpeedRef(0, 200, 40);
42     robot.writeSpeedRef(1, 200, 40);
43     delay(600);
44     robot.writeSpeedRef(0, 300, 1000);
45     robot.writeSpeedRef(1, 300, 1000);
46     delay(600);
47     robot.writeSpeedRef(0, 400, 40);
48     robot.writeSpeedRef(1, 400, 80);
49     delay(3000);
50     robot.writeMotorRun(2, false);
51   }
52 }
53
23 void loop() {
24   // put your main code here, to run repeatedly:
25   if (digitalRead(2) == 0) {
26     robot.writeMotorRun(2, true);
27     robot.writeMotorDir(0, 1);
28     robot.writeMotorDir(1, 1);
29     robot.writeMotorTorqueRef(0, 30000);
30     robot.writeMotorTorqueRef(1, 30000);
31     while(1) {
32       int x = analogRead(A9);
33       if (x < 100) {
34         robot.writeMotorRun(2, false);
35       }
36       else {
37         robot.writeMotorRun(2, true);
38         delay(200);
39       }
40       robot.writeSpeedRef(0, x, 110);
41       robot.writeSpeedRef(1, x, 110);
42       delay(200);
43     }
44   }
45 }
46
54 }
```

Рисунок 4 – Программный код внедрения потенциометра

Данный робот был усовершенствован внедрением потенциометра, позволяющего получить плавное управление режимами пуска двигателя. В связи с этим появляется возможность использования робота как механизма моделирования и установления параметров для повышения энергоэффективности нагнетателей ТЭС.

Созданный программный продукт «EneSaveCalc» может быть использован при экспресс-аудите вспомогательного оборудования ТЭС.

Литература:

1. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. — 176 с.
2. <http://www.siemens.kz/assets/template/assets/resheniya/files/Каталог%20Решения%202015.pdf>
3. <http://en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/lekc-8-9-09-2.pdf>

**ВОПРОСЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К  
НОВЫМ КОНСТРУКЦИЯМ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ**

**Авторы:** Бахтияр Б.Т., Отынчиева М.Т., Кибарин А.А., Кумаргазина М.Б., Коробков М.С., Орумбаев Р.К.

**Организация:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева», г. Алматы, Казахстан

**Аннотация:** На основе экспериментальных исследований проведены тепловые и конструктивные расчеты водогрейного котла с заэкраным газоходом на твердом топливе. Выполнена прогнозная оценка конструктивных, технических характеристик, экономического и экологического эффекта от внедрения новых водогрейных котлов мощностью 34,8 и 116 МВт, с расходом труб в два раза меньше чем у серийных котлов. Разработка основана на результатах серии теплотехнических испытаний водогрейных котлов КВа-3,15 с коаксиальными двусветными экранами.

**Ключевые слова:** Двусветный коаксиальный экран, заэкраный газоход, экономический эффект, КВ-ТК-100 котел водогрейный твердотопливный камерный.

**Постановка проблемы.** Вопросы по совершенствованию топочной части котлов с широким использованием обратной стороны труб экранов для восприятия максимально возможного количества тепла в топке может существенно сократить расход металла. Сокращение расхода котельных труб, производство которых требует больших затрат при разработке новых конструктивных схем водогрейных котлов представляет важную научно-техническую задачу. Конвективные части водогрейных (паровых) котлов являются одним из наиболее металлоемких элементов подверженных низкотемпературной коррозии и будучи замыкающей поверхностью нагрева котла, определяют полноту утилизации тепла продуктов сгорания. Ежегодно подлежат замене только по Казахстану до 10 тысяч тонн котельных труб, затраты на их замену составят порядка 4,0 млрд. тенге [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научные исследования по снижению удельного расхода металла при разработке новых водогрейных и паровых котлов и связанных с ними повышением экономичности, снижением экологической безопасности в условиях эксплуатации посвящены теоретические и практические исследования, приведенные в работах [2, 3, 4]. Новые исследования с экономическим обоснованием

применения новых водогрейных котлов с улучшенными техническими показателями рассматривались в работах [5, 6].

Нерешенные части проблемы. Существующие исследования по увеличению экономической эффективности и экологической безопасности серийных водогрейных котлов серии КВ-ТК в составе ТЭЦ и котельных на твердом топливе дают повод для дальнейшего поиска новых подходов и новых конструктивных решений [7, 8]. Недостаточно исследований по увеличению тепловой эффективности поверхности труб экранов с целью снижения удельного расхода стальных труб. Недостаточно работ по экономическим и экологическим аспектам применения двусветных коаксиальных цельносварных экранов со 100 % использованием поверхности труб в новых водогрейных котлах для работы на твердом топливе позволяющих сдерживать новыми исследованиями и эффективными разработками фактор роста тарифов на тепло.

Основной целью исследования является разработка новой серии твердотопливных водогрейных котлов, с использованием 100 % обратной стороны топочного цельносварного коаксиального экрана, тепловой производительностью 34,8 МВт и 116МВт разработанных в Республике Казахстан. В новых конструкциях твердотопливных котлов планируется снизить расход котельных труб, работающих под давлением в два раза. Определить границ применимости по тепловой мощности и эффективности конструкции котла со сниженным удельным расходом металла труб на твердом топливе. Провести сравнение с известными твердотопливными водогрейными котлами такой же тепловой мощности по конструктивным, техническим и экономическим параметрам.

Основные результаты исследования. Предварительно проведены комплексные теплотехнические испытания и экспериментально проверена тепловая эффективность работы коаксиального двусветного экрана в цилиндрическом водогрейном котле тепловой производительностью от 0,63 до 3,15 МВт, при работе на дизельном топливе. Теплотехнические испытания водогрейных котлов с коаксиальным двусветным экраном проводились в заводской (ТОО «Казкотлосервис», г. Алматы) лаборатории по стандартной методике с компьютерной обработкой теплотехнических и экологических параметров. Серийные водогрейные котлы серии КВа, представленные к испытаниям, изготовлены в ТОО «Казкотлосервис» имеют Сертификаты соответствия Евразийского союза [9]. Результаты теплотехнических испытаний показали, что использование обратной стороны коаксиальных двусветных экранов позволяет в комплексе воспринимать двумя сторонами в пределах длины или высоты топки радиацией более 60 % от всего тепла, выделяемого в топке котла.

Анализ работы существующих котлов и результаты промышленных испытаний позволил авторам разработать технический проект нового водогрейного котла тепловой мощностью 34,8 МВт, 116 МВт на твердом топливе с сухим шлакоудалением. По тепловым расчетам и конструктивной разработке масса нового водогрейного котла тепловой мощностью 116 МВт с новой подвеской составила 257,5 т. По сравнению с известным твердотопливным водогрейным котлом КВ-ТК-100-150-4 для Экибастузского угля весом 572,9 т. [10, 11]. (ПО «Сибэнергомаш» г. Барнаул) новый котел в 2,22 раза легче. Удельный расход металла нового котла 2,2 т/МВт, у водогрейного котла КВ-ТК-100-150-4 с камерным сжиганием Экибастузского угля он составил 4,93 т/МВт.

Теплофикационный котел нового типа имеет цилиндрическую или многогранную топку в плане [1]. Аэрированная угольная смесь поступает тангенциально с четырех сторон в нижнюю цилиндрическую или многогранную вихревую камеру и основная масса летучих активно выделяясь, сгорает в закрученном вторичным воздухом потоке. Далее продукты неполного сгорания из топки поступают закрученным потоком в вертикальную цилиндрическую или многогранную камеру охлаждения, образованную из труб  $\text{Ø}60 \times 4$  мм, сваренными между собой мембранами образуя цельносварной экран. В верхней части камеры охлаждения трубы разведены в двух или трехрядный фестон, через который продукты сгорания попадают в заэкраный газоход. С обратной стороны топочного экрана и с внутренней стороны наружного экрана продукты сгорания вращаясь, опускаются вниз с продольной скоростью до 20 м/с. Конвективные поверхности заэкранного газохода работают в режиме самостоятельной обдувки, обеспечивая тем самым высокий коэффициент теплоотдачи и не требуют систем очистки от зольных отложений с генераторами ударных волн ГУВ.

Новая подвеска котла позволяет уменьшить общую массу металла в заводской поставке на 32,5%. Высота здания котельной составляет 12 м с котлом мощностью 34,8 МВт и высотой котла 17,8 м. Для котла 116 МВт высотой 24 м здание котельной имеет высоту 16 м. Выступающие части котлов над крышей котельной сверху закрываются двумя раздвижными облегченными теплоизолированными кожухами. Высота серийного котла КВ-ТК-100 составляет 26,5 м, а высота корпуса котельной с указанным котлом составляет 31 м.

Расход Шубаркульского угля средней калорийностью  $Q^u_p = 5400$  ккал/кг для котла 34,8 МВт составляет 5915 кг/ч, котла 116 МВт – 19875 кг/ч и серийного котла КВ-ТК-100 – 20496 кг/ч. Объемы топки котлов для 34,8 МВт, 116 МВт и КВ-ТК-100-150 соответственно составляют: 178,5 м<sup>3</sup>; 790 м<sup>3</sup> и 902 м<sup>2</sup>. Тепловое напряжение топки соответственно для котлов составляет: 179 000 ккал/м<sup>3</sup>ч; 136 000 ккал/м<sup>3</sup>ч 117 000

ккал/м<sup>3</sup>ч. Такие величины теплового напряжения объема топки объясняется тем, что в новых котлах сильно закрученный поток факела в топке и далее продуктов сгорания, в камере охлаждения продолжая вращательное движение, полностью удовлетворяют условиям выгорания коксовых и зольных частиц угля.

Радиационная поверхность нагрева сравниваемых котлов для 34,8 МВт, 116 МВт и КВ-ТК-100-150 соответственно составляет: 200,7 м<sup>2</sup>; 550 м<sup>2</sup> и 663 м<sup>2</sup>, при этом суммарная поверхность нагрева соответственно составляет: 2101,3 м<sup>2</sup>; 6629,6 м<sup>2</sup> и для котла КВ-ТК-100 соответственно 10630 м<sup>2</sup>. При этом для двух новых котлов поверхность пластинчатого подогревателя имеет поверхность соответственно: 1492,7 м<sup>2</sup>; второго 4688 м<sup>2</sup>.

Поверхность трубчатого воздухоподогревателя котла КВ-ТК-100 составляет 8800 м<sup>2</sup>. Коэффициент полезного действия (брутто) для сравниваемых водогрейных котлов для 34,8 МВт, 116 МВт и КВ-ТК-100-150 соответственно составляет: 93,4 %; 93,4% и 89,8 %. Температура уходящих газов за котлом составляет соответственно для мощности 34,8 МВт - 140°C; для мощности 116 МВт - 140 °С и за котлом КВ-ТК-100-150 в пределах 192 - 209 °С.

Круглый или многогранный профиль водогрейного котла в плане и по всей высоте исключает применение конвективных пакетов труб, которые в известных серийных котлах создают наибольшие эксплуатационные затруднения из-за коррозии из-за отложений. В котле вместо конвективных труб используется облегченный пластинчатый воздухоподогреватель, длительная работа которого проверена на байпасе конвективной части парового котла №6 БКЗ-160-100Ф02 Алматинской ТЭЦ-3. Цельносварной и газоплотный заэкраный газопровод может работать под наддувом и дополнительно экономит энергию на собственные нужды.

Схема циркуляции воды в трубах новых котлов производительностью 34,8 МВт и 116 МВт разработана в двух вариантах. Первый вариант запроектирован по последовательным шести ходам по каждой третьей части труб диаметром Ø50×4 мм с расходом воды 375 т/ч для котла 34,8 МВт и 1235 т/ч для котла 116 МВт. Подача воды осуществляется в нижний коллектор с перегородками, обеспечивающей подвод воды к 56 трубам (34,8 МВт) или к 96 трубам топочного экрана для нового котла 116 МВт. В верхней каждой третьей части труб топки обеспечивается последовательно три перепуска и после шестого хода направляется в средний коллектор и выводится из котла.

Вторая схема циркуляции для водогрейных котлов 34,8 МВт и 116 МВт имеет всего два хода по воде. Вода с расходом 1220 т/ч из нижнего коллектора без перегородки поступает одновременно во все 168 труб Ø50 топочного экрана со скоростью 1,52 м/с для котла 34,8 МВт или с расходом 2470 т/ч во все 288 труб Ø50 топочного экрана со

скоростью 1,805 м/с для котла 116 МВт. В верхних перепускных коллекторах без перегородок, весь поток воды перепускается во все трубы наружного экрана. По всем трубам наружного экрана со скоростью 1,38 м/с для котла 34,8 МВт или по всем трубам наружного экрана со скоростью 1,57 м/с для котла 116 МВт вода опускается вниз и собирается в среднем коллекторе, из которого направляется в сеть. В конструкциях водогрейных котлов скорость воды принята в соответствии с допустимыми тепловыми напряжениями в топке и в наружном экране.

Во втором варианте более высокая и равномерно распределенная температура воды на входе в котел обеспечивает более длительную работу поверхностей нагрева, исключая возможности коррозии труб. Расход мощности на преодоление сопротивления в пределах котла во втором варианте на 4 кВт для котла 34,8 МВт или на 7,8 кВт для котла 116 МВт ниже, чем в первом варианте. В пересчете на 5000 часов работы в году, получается экономия электроэнергии 20 000 кВтч/год для котла 34,8 МВт или 39 000 кВтч/год для котла 116 МВт.

Ремонт нового котла осуществляется после разводки двух облегченных кожуха над крышей котельной путем выдвигания наружных экранов вверх. Для водогрейного котла 34,8 МВт наружные трубы поднимаются целиком вместе со средним коллектором, а для котла 116 МВт может выполняться с предварительным разъемом наружного экрана на 3 или 6 секторов с отводом их в сторону и вверх, как с частями среднего коллектора, так и без него. Таким путем осуществляется доступ к обратной стороне топочных экранов для их ремонта или замены. Подвеска котла осуществляется за усиленный бандажный пояс котла, который крепится на уровне выше середины высоты наружного экрана. Уровень крепления подвески котла и определяет небольшую высоту сейсмостойкой котельной. Над котельной выступает только призматический крытый облегченный разборный кожух верхней части котла.

Котлы на твердом топливе комплектуются пластинчатыми воздухоподогревателями различной модификации, удобные в обслуживании и ремонте.

Прогнозная оценка экономического и экологического эффекта от внедрения новых водогрейных котлов 34,8 МВт и 116 МВт взамен старых серийных образцов составит 103,95 млн. тенге в год с дисконтированным сроком окупаемости от 3,6 лет, за счет экономии топлива, эксплуатационных затрат, стоимости самого котла, сокращения выплат за вредные выбросы.

Выводы. При реализации нового профиля водогрейного котла с высокими экологическими показателями при использовании Казахстанских углей будет достигнута существенная экономия металла, повышенные экономические и экологические показатели

котлов. Прогнозная оценка экономических и экологических показателей новых котлов с учетом свойств Казахских углей показывает возможность внедрения нового водогрейного котла. В Казахстане имеется опыт изготовления водогрейных котлов мощностью до 116 МВт.

#### Литература:

1. Орумбаев Р.К., Ходанова Т.В., Коробков М.С. Экономические и экологические аспекты применения двухсветных коаксиальных экранов в водогрейных котлах. Actual Problems of Economics. ISSN – 1993-6788. Киев. №2 (188), 2017. – С. 140 – 150.

2. Ведрученко В.Р., Жданов Н.В. Энергоэкологическая эффективность организационных и технических мероприятий при эксплуатации муниципальных котельных // Промышленная энергетика. 2008. №11.

3. Абдуллин М.З., Овсиенко И.П., Дворцин Г.Р. и др. Оптимизация топочного процесса – путь к повышению эффективности экологической безопасности надежности работы котлов // Новости теплоснабжения. 2008. №4.

4. Орумбаев Р.К., Кибарин А.А., Ходанова Т.В., Коробков М.С., Сейдалиева А.Б., Отынчиева М.Т. Опыт длительной эксплуатации водогрейного котла КВ-ГМ-7,56-95. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 10. С. 169-174.

5. Серант Ф.А., Белоруцкий И.Ю., Ершов Ю.А., Гордеев В.В., и др. Котел с кольцевой топкой для энергоблока 660 МВт на суперсверхкритические параметры при сжигании бурых шлакующих углей // Теплоэнергетика. – 2013. – № 12. – с. 16-22.

6. Методи оцінки екологічних витрат: Монографія / За ред. д.е.н. Л.Г. Мельника та к.е.н. О.І. Карінцевої. – Суми. Університетська книга 2004. – 288 с.

7. Рубцов А.А., Козлов С.Г., Шестаков С.М. и др. Результаты внедрения НТВ-технологии сжигания на котле КВТК- 100-150 ст. № 9 котельной ООО «Крастяжмашэнерго» // Материалы IX Всероссийской науч.-практ. конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». Красноярск, 2008. С. 19-24.

8. R.K. Orumbaev, T.V. Khodanova, A.A. Kibarin, Sh.R. Orumbaeva, M.S. Korobkov, A.F. Volkov. To the question about thermal efficiency of double-height screens in liquid fuel hot-water boilers up to 3.15 MW capacity. Full Papers Proceeding of International Conference «Power Plants 2016», November 2016, Zlatibor Serbia, pp. 967 – 973.

9. Сертификат соответствия №ТС КЗ.7500525.22.01.00105 Серия КЗ. Котлы водогрейные серии ККС. 17.07.2014 г. Алматы.

10. Котлы водогрейные (30 Гкал/ч до 180 Гкал/ч). Продукция. Официальный веб-сайт ООО «Сибэнергомаш - БКЗ» [электронный ресурс]. <http://www.sibem-bkz.com/ru/production-boilers-hot-water/>, был доступен 10.02.2020г.

11. О.Г. Шишканов, И.В. Андруняк. Расчетно-экспериментальное исследование теплообмена в топке водогрейного котла КВ-ТК-100. Проблемы энергетики, 2008, № 3-4 стр.32-40.

## **РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТБО В МОДУЛЬНЫХ МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ УЛАВЛИВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ**

**Авторы:** Искаков Д.О., Жекенов Е.О., Кибарин А.А., Орумбаев Р.К., Отынчиева М.Т.,  
Торгаев А.А., Ходанова Т.В.

**Организация:** НАО «Алматинский Университет энергетики и связи им. Гумарбека  
Даукеева», г. Алматы, Казахстан

Разработаны инновационные методы термической переработки ТБО в модульных мусоросжигающих установках с механическими топками водогрейных котлов от 1,16 МВт с дожиганием газов над слоем и с высокой степенью улавливания вредных выбросов в компактных эмульгаторах и фильтрах с активированным углем.

Постановка проблемы.

В Казахстане ежегодно накапливается более 13 млн. м<sup>3</sup> твердых бытовых отходов (ТБО), в том числе в городе Алматы и пригороде более 2 млн. м<sup>3</sup>. Анализ, проведенный за последние 5 лет, отмечает тенденцию к ежегодному увеличению поступления ТБО на объекты захоронения в среднем на 10 – 12 %.

Ежегодно на свалки ТБО выделяется значительная дополнительная площадь земель, зачастую потенциально ценных сельхозугодий. Только по состоянию на 2019 год, отведенные площади под свалки по республике превышают 1200 га. Исследования показали [1], что на более чем 90 % свалок, отсутствует система гидравлической защиты, а у менее половины свалок имеется санитарно-защитная зона. В целом анализ, проведенный по регионам РК, показал [2], что в Республике отсутствует система сортировки и переработки вторичных ресурсов и ТБО. Техническое обеспечение и подготовительная работа среди населения по сбору ТБО находится на низком уровне, поэтому на свалки поступает до 50 % всех годовых ресурсов бумаги и до 20 % черных и цветных металлов и других ценных компонентов. Повсеместно нарушаются (превышают) нормы накопления ТБО от объектов жилищного фонда, общественного назначения, торговых (оптовые рынки) и культурно-бытовых учреждений, учебных заведений и школ.

Отдельная проблема это перевозка и транспортировка ТБО до мусороперегрузочных станций и далее. За рубежом получает развитие транспортировка с применением мусоровозов большой вместимости, с использованием железнодорожных платформ, речных и морских барж.

Обезвреживание ТБО должно осуществляться эффективными в санитарном, экологическом и технико-экономическом отношении методами [3,4].

В большей степени должны применяться утилизационные методы с максимальным использованием всех полезных свойств отходов путем переработки основной части ТБО в органическое удобрение и биологическое топливо. В меньшей степени следует использовать ликвидационные, не предусматривающие использование полезных свойств отбросов: захоронение на свалках, сброс в выработанные шахты, карьеры, вывоз в море и сжигание отбросов без использования тепла.

По технологической сущности методы обезвреживания могут быть разделены на следующие виды[3,5]:

- биологические – ликвидационные и утилизационные с переработкой ТБО микроорганизмами;
- термические – сжигание без использования тепла и с использованием тепла, пиролиз с получением горючего газа;
- химические – гидролиз;
- механические – прессование и изготовленных различных блоков с использованием связующих материалов и добавок.

Анализ последних исследований, публикаций и нерешенные части проблемы.

В настоящее время в мире работает более 2500 мусоросжигающих заводов и большинство из них в самых развитых странах, в том числе и в центре Европы.

Примером могут служить наиболее эффективные и экологически чистые мусоросжигательные заводы в Германии, Италии, Австрии (один из заводов работает прямо в черте города Вены) [3,4,5]. Во Франции утилизация бытовых отходов на 34 предприятиях с выработкой на их основе тепла и электроэнергии позволяет получать экономию энергии в пересчете на нефтяной эквивалент более 300 тыс. тонн в год. В Германии используется более 33 % из более 25 млн. т/год бытовых отходов, которые сжигаются на более чем 42 предприятиях, для получения электроэнергии и пара. В Дании используется более 70% бытовых отходов, в Швеции более 80% и половина в качестве топлива. По подсчетам Шведских ученых, сжигание 5 тонн бытовых отходов дает такое же количество энергии, как сжигание 1 тонны мазута или 2 тонн угля. При этом 1 т мазута обходится в 1400 шведских крон, а подготовка к сжиганию 1 т бытовых отходов в 160 шведских крон, т.е. почти в девять раз дешевле. Пересчет стоимости при подготовке к сжиганию ТБО в Казахстане и сравнение со стоимостью мазута у нас в тенге составит почти такое же соотношение.

В Италии успешно работают мусоросжигающие заводы в городе Модена с электрической мощностью 19 МВт, в городе Болонья 37 МВт, в городе Феррара 70 МВт, в городе Равенна 28 МВт, в городе Форли и в городе Римини Кориано до 80 МВт. При этом системы очистки и улавливания находятся под постоянным и непрерывным контролем надзорных органов Италии. Причем из дымовых труб указанных мусоросжигательных заводов практически не наблюдаются видимые невооруженным глазом выбросы или сизого и темного цвета дым.

Начиная с 2017 года в Российской Федерации запускается в эксплуатацию порядка 200 мусоросжигательных заводов. Практически начато расширенное производство мощных котлов на Подольском котельном заводе с покрытием стальных цельносварных экранов специальным составом для увеличения срока службы при сжигании ТБО [6, 7]. Следует отметить широкое и успешное применение топков с сжиганием бытовых отходов и эффективной выработкой электроэнергии в скандинавских странах, США и Великобритании. В Нью Джерси (США) введена еще в 1988 году в эксплуатацию установка, рассчитанная на утилизацию 106 тыс. т в год отходов с проектной теплотой сгорания 12,3 МДж/кг (с базой 10,5 МДж/кг). Установка обеспечила централизованным теплоснабжением района с населением 550 тысяч человек. Занимаемая станцией площадь составила 10 га. Следует отметить, что электростанция состоит из двух независимых технологических установок, каждая из которых рассчитана на сжигание 180 т отходов в день. Имеется опыт успешной эксплуатации (с 1976 г.) электростанции Бернارد Роуд в Шеффилде (Англия). На этой станции ежегодно сжигается 102 тыс. тонн бытовых отходов. Котел с тепловой мощностью 24,4 МВт, паровой производительностью 32 т/час с давлением 1 МПа (10 кг/см<sup>2</sup>) обеспечивает теплом район с населением 100 тысяч человек. Значительных успехов в разработке и развитии технологии сжигания ТБО с целью получения тепла и электроэнергии добилась швейцарская компания W+E Umwelttechnik, Цюрих.

Представляет определенный интерес мусоросжигающий паровой котел (Российская Федерация) Е-6,5-1,4-225 «О» (КЕ-6,5-14-225 ТБО) паровой производительностью 6,5 т/час, предназначенный для сжигания несортированных твердых бытовых отходов (ТБО) с расходом 3 т/час. Котел вырабатывает перегретый пар для обеспечения технологических нужд предприятия или для целей теплоснабжения, вентиляции и горячего водоснабжения.

Цель исследования.

Реализация разработок осуществляемых в НАО АУЭС позволит во многом улучшить ситуацию с утилизацией ТБО в Казахстане, сжигать сортированные ТБО более

4,3 млн. тонн в год, которые выбрасываются в отвалы и полигоны. Новые технологии в области топливо- и мусоросжигающих устройств высвободят дополнительно до 688 000 тонн качественного угля для коммунально-бытовых нужд в Республике Казахстан на сумму более 11,69 млрд. тенге и снизят выбросы в атмосферу токсичных веществ и парниковых газов. Обезвреживание продуктов сгорания ТБО за счет эффективного сжигания сортированных ТБО в котлах с колосниковыми решетками и новыми системами газовой очистки, позволит экономить в пять раз площади полигонов и в разы удешевить вырабатываемое тепло или электроэнергию за счет низкой стоимости топлива из ТБО. Известно, что топливная составляющая является основным пунктом затрат в коммунальных котельных и на электрических станциях.

Наличие собственного производства водогрейных и паровых котлов с комбинированными топками и эффективными пылеулавливающими и газоочистными установками позволит производить продукцию казахстанского содержания на более чем 1,0 миллиард тенге. Создать новые рабочие места по регионам Казахстана на модульных мусоросжигающих установках, оборудованных новыми механическими топками водогрейных и паровых котлов тепловой мощностью от 1,16 МВт и до 11,6 МВт с дожиганием над слоем. Высокая степень улавливания вредных выбросов обеспечивается новыми эффективными устройствами – эмульгаторами с удельным расходом воды по замкнутому контуру до 120 г/м<sup>3</sup> газов. Система газоочистки производится батарейными кассетами с активированным углем.

Основные результаты разработки.

Разрабатываются рабочие чертежи водогрейного котла КСТ-1,16 с механическими качающимися чугунными колосниками в комплекте с рабочей документацией передвижной модульной комплектной котельной с системой автоматики тепловой мощности до 2,32 МВ с дымовой трубой. Разработан эскизный проект бункера питателя с дозатором для подачи ТБО в топку котла КСТ-1,16, с эскизным проектом эмульгатора с коэффициентом улавливания до 99,97 % твердых фракций при сжигании ТБО.

Подготовлены исходные данные для разработки технической документации с применением современных программных продуктов 3D проектирования для подготовки производства первых образцов модульных мусоросжигающих установок. Установки по проекту укомплектованы новыми механическими топками для водогрейных и паровых котлов тепловой мощностью от 1,16 МВт и до 11,6 МВт с дожиганием над слоем. В комплекте с эффективной очисткой вредных выбросов компактными эмульгаторами и фильтрами с применением батарей с активированными углями с применением

автоматизированных систем управления топочным процессом для крупных городов и районных центров Республики Казахстан.

В НАО «АУЭС имени Гумарбека Даукеева» осуществляется подготовка к первым экспериментам в полупромышленных условиях по опытному сжиганию ТБО на слоевой ручной колосниковой решетке с полезным использованием тепла. Готовятся к экспериментальной проверке новые сухие системы улавливания твердых фракций в газоходе за стальным водогрейным котлом.

Выводы:

Разрабатываются рабочие чертежи стального водогрейного котла КСТ-1,16 с механической топкой и качающимися колосниками для сжигания в слое ТБО в комбинации с газовой горелкой над горящим слоем. Ведется разработка проекта блочно-модульной котельной тепловой производительностью до 2,32 МВт, в комплекте с компактным эмульгатором с применением автоматизированных систем управления топочного процесса в котле КСТ-1,16. Осуществляется подготовка к первым экспериментам в полупромышленных условиях по опытному сжиганию ТБО на слоевой ручной колосниковой решетке с полезным использованием тепла. Готовятся к экспериментальной проверке новые сухие системы улавливания твердых фракций в газоходе за стальным водогрейным котлом.

Литература:

1. О сборе, вывозе, переработке (сортировке) и захоронении (депонировании) коммунальных отходов в Республике Казахстан / Статистика окружающей среды, 4 серия. Официальный бюллетень Комитета по статистике РК за 2018 год. [электронный ресурс] (<https://stat.gov.kz/official/industry/157/statistic/6> был доступен 10.02.2020г.)
2. Охрана окружающей среды и устойчивое развитие Казахстана. Статистический сборник. На казахском и русском языках. Официальное издание Комитета по статистике РК за 2014-2018г. [электронный ресурс] (<https://stat.gov.kz/official/industry/157/publication> был доступен 10.02.2020г.).
3. World Bank. What a Waste: Global Review of Solid Waste Management. – Washington: Urban Development, 2012.
4. Ziadat A, Mott H. Assessing solid waste recycling opportunities for closed campuses // Management of Env Quality. – 2005. – Vol. 16, № 3. – P. 250 – 256.
5. Mickael D. Categorization and Sorting for Waste Management // Int. J. Waste Resour. – 2016. – Vol. 6, № 2.

6. Патент Республики Казахстан. №18797. Водогрейный котел. Орумбаев Р.К. Айрих Ю.Э. и др. Оpubл. Бюлл. №9, 17.09.2007 г.

7. «ЗиО-Подольск»: первый котел для подмосковных мусоросжигательных заводов готов на 90 %. Видеоневости «ЗиО-Подольск», официальный веб-сайт «ЗиО-Подольск», [электронный ресурс] (<https://www.podolsk.ru/videonews/v3270.html> был доступен 10.02.2020г.).

## УЛУЧШЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ГОРОДЕ НУР-СУЛТАН ПУТЕМ ПЕРЕВОДА НА ГАЗ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ НА ТЭЦ-2

**Авторы:** Мергалиев Н. Т., Тютеебаева Г. М.

**Организация:** Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан

Быстрое развитие города Нур-Султан обуславливает рост потребности в тепловой и электрической энергии.

В настоящее время акиматом г. Нур-Султан было инициировано проектирование систем газоснабжения города Нур-Султан. Для решения этого вопроса построен магистральный газопровод Караозек – Жезказган – Караганда – Темиртау – Нур-Султан. Это позволит обеспечить природным газом более 2,7 миллионов человек, что положительно скажется на экологической обстановке страны [3, с. 4].

Проект газификации столицы предусматривает, в том числе: реконструкцию ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 с переводом водогрейных котлов ТЭЦ на сжигание природного газа с сохранением возможности работы на угле. Реализация данного проекта позволит улучшить экологическое состояние окружающей среды города.

Экологические проблемы связаны с твердыми отходами ТЭС (зола и шлаки). Хотя зола в основном улавливается различными фильтрами, все же в атмосферу в виде выбросов ТЭС ежегодно поступает большое количество мелкодисперсных аэрозолей. Выбросы ТЭС являются существенным источником таких сильных канцерогенных веществ, как полиароматические углеводороды. В выбросах угольных ТЭС содержатся также оксиды кремния и алюминия.

Проблему вблизи ТЭС представляет складирование золы и шлаков. Для этого требуются значительные территории, которые долгое время не используются, а также являются очагами накопления тяжелых металлов и повышенной радиоактивности [1, с. 564].

Котельное оборудование на ТЭЦ-2 в городе Нур-Султан спроектировано для сжигания относительно дешевого Экибастузского каменного угля. В процессе выработки пластов топлива качество поставляемого угля постоянно ухудшалось, что приводит к постоянному увеличению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Перевод с твердого топлива на природный газ ведет к удорожанию вырабатываемой энергии, но так можно значительно сократить объем выбросов и поддерживать

нормальное состояние окружающей среды. При сжигании природного газа в дымовых выбросах также содержится диоксид серы, и оксиды азота.

Изучив состав выбросов ТЭЦ-2 в городе Нур-Султан, определено, что основными загрязняющими веществами, выбрасываемыми в воздушный бассейн города, являются угольная пыль и зола, которая содержит частицы тяжелых металлов. Этим и обусловлен перевод водогрейных котлоагрегатов на ТЭЦ-2 на сжигание природного газа, тем самым уменьшив выбросы загрязняющих веществ.

Перевод на природный газ котлоагрегатов в водогрейном котельном цехе на ТЭЦ-2 планируется в 2020-2021 годах. К ТЭЦ планируется подвести газопровод от газораспределительной станции Астана-1 с установкой газораспределительного пункта для газоснабжения в водогрейный котельный цех.

В водогрейной котельной установлены шесть водогрейных котла КВ-Т-139,6-150 теплопроизводительностью по 120 Гкал/ч производства ПО «Сибэнергомаш».

Котёл водогрейный, вертикально-водотрубный, с принудительной циркуляцией, башенной компоновки, с уравновешенной тягой.

Топочно-горелочное устройство представлено 4-мя прямоочными горелками, установленными тангенциально в один ярус, и системой нижнего дутья. Топочно-горелочное устройство с системой нижнего дутья обеспечивает снижение выбросов оксидов азота до нормативной величины. Котел оснащен 4-мя растопочными горелками.

Система пылеприготовления водогрейных котлов индивидуальная, замкнутая, с молотковыми мельницами и прямым вдуванием топлива в котле.

Система золоулавливания – мокрые батарейные эмульгаторы с КПД 99,6%.

На водогрейном котле КВ -Т-139,6-150 при введении дополнительного основного топлива природного газа с сохранением твердого топлива в качестве резервного будут заменены горелки на новые производства ОАО "Сибэнергомаш-БКЗ", устанавливаются дополнительные площадки обслуживания в районе горелок, устанавливается дымосос рециркуляции газов ДН-12,5БК с трактом рециркуляции дымовых газов.

Для организации топочного процесса топка оборудуется четырьмя малотоксичными прямоочными вертикально-щелевыми горелками, установленными на боковых стенках топки тангенциально к воображаемой окружности.

Каждая горелка с чередующейся подачей пылевоздушной смеси и вторичного воздуха состоит из воздушного короба и встроенных в него каналов аэросмеси. Для равномерного распределения воздуха по высоте выходного сечения горелки воздушный короб имеет направляющие перегородки.

Газораздающее устройство горелки выполняется однопоточным. Трубки газового коллектора заводятся в воздушный канал по вертикальной оси горелки. Из коллектора газ подается в горелку с помощью газораздающих труб малого диаметра с раздающими насадками. По оси горелочного устройства встроена труба для установки мазутной форсунки. Все горелки оборудованы запально-сигнализирующими устройствами пневматическими инъекционными типа ЗСУ-ПИ-45 с датчиком ФДСА, предназначенными для обеспечения дистанционного розжига запальника и факела горелки. Топливом для ЗСУ-ПИ может служить как природный газ, так и пропан-бутановая смесь.

По условиям взрывобезопасности растопка котла на жидком топливе или газе может начинаться с розжига любой горелки и выполняться в последовательности, указанной в инструкции по эксплуатации котельной установки.

Проектом предусматривается возможность работы котла на любом из перечисленных выше видов топлива, а также одновременная работа на разных видах топлива.

Для организации топочного процесса котла, предназначенного для сжигания каменного угля и природного газа, топка оборудована пылегазовыми горелками.

Каждая пылегазовая горелка предназначена для отдельного сжигания угольной пыли и природного газа. Также допускается сжигать в одной горелке совместно с угольной пылью не более 30% природного газа.

После реконструкции ВКЦ ТЭЦ-2 с переводом котлов на природный газ, выбросы загрязняющих веществ уменьшаются по сравнению с установленными нормативными:

- по диоксиду азота на 1 185 т/год, ( $\text{NO}_2$  – 4%);
- по оксиду азота на 192 т/год ( $\text{NO}(\text{II})$  – 3,9%);
- по диоксиду серы на 3 235 т/год ( $\text{SO}_2$  – 100%);
- переход на газовое топливо позволяет полностью исключить выбросы – пыли неорганической двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$  – 100%);
- выбросы оксида углерода уменьшатся на 115 т/год ( $\text{CO}_2$  – 70%).

Судя по вышеперечисленным показателям, можно сделать вывод, что снижение выбросов загрязняющих веществ после проведения реконструкции водогрейных котлоагрегатов на ТЭЦ-2 в городе Нур-Султан снизится примерно в 30 раз, что должно положительно повлиять на экологическую ситуацию в близлежащих районах к ТЭЦ 2, внося вклад в улучшение экологической ситуации.

После растопки котла на газе при переводе котла на сжигание твердого топлива все газовые горелки должны находиться в работе. Перевод котла на сжигание твердого

топлива должен производиться только при достижении устойчивого горения факела газовых горелок и при тепловой нагрузке топки близкой к 30% номинальной.

По мере включения в работу пылесистем и при достижении устойчивого горения пыли в топке поочередно отключить газовые горелки и увеличивать подачу пыли в топку.

#### Литература:

1. Третьяков А. Н., Перегудина Е. В., Азарова С. В. О влиянии на атмосферу предприятий теплоэнергетического комплекса // Молодой ученый. — 2015. — №11. — С. 562-566. — URL <https://moluch.ru/archive/91/19248/> (дата обращения: 28.01.2020).
2. ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций – 2007 – URL <http://www.adilet.gov.kz/ru/node/1412/> (Дата обращения: 28.01.2020).
3. Назарбаев Н. А. Пять социальных инициатив Назарбаева – 2018 – URL <https://www.zakon.kz/4907318-pyat-sotsialnyh-initsiativ-nazarbaeva.html> – (Дата обращения: 29.01.2020).
4. Росляков П.В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 336 с.
5. В.И. Беспалов, С.У. Беспалова, М.А. Вагнер. Природоохранные технологии на ТЭС: учебное пособие – Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 240 с.

## Мировые тенденции развития технологии сжигания твердых топлив в ЦКС. Опыт начальной эксплуатации котла с ЦКС блока мощностью 330 МВт Новочеркасской ГРЭС

**Автор:** Рябов Г.А.

**Организация:** АО «Всероссийский теплотехнический институт», г. Москва, Россия

Технология циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) впервые была использована на установках каталитического крекинга углеводородов, а с середины семидесятых годов и для сжигания твердых видов топлива. В настоящее время технология сжигания и газификации топлива в ЦКС является общепризнанной промышленной технологией, реализованной на тысячах объектов. История ее развития, успехи применения и новые технологические решения, направленные на улавливания CO<sub>2</sub> и газификацию в связанных между собой реакторах представлены в [1]. Новые тенденции и роль технологии ЦКС в условиях меняющегося энергетического рынка показана в докладе на недавно прошедшей конференции CFB12 [2]. Основные изменения рынка связаны с возрастающими требованиями к экологической чистоте, повышению эффективности, надежности и соответствия требованиям быстрого изменения нагрузки. Постоянно возрастающая доля использования возобновляемых источников энергии и требования по снижению выбросов парниковых газов также оказывают влияние на энергетический рынок.

Ряд вопросов, связанных с современными требованиями и преимуществами котлов с ЦКС, рассмотрен в [3]. В ней на конкретных примерах показаны возможности и современные технические решения позволяющие повысить эффективность блоков с котлами ЦКС (утилизация тепла уходящих газов, повышение параметров пара), их маневренные характеристики, Дальнейшее снижение вредных выбросов, также рассмотрены преимущества технологии ЦКС, связанные с топливной гибкостью и возможностью снижения выбросов парниковых газов.

В работах ОАО «ВТИ» на основе анализа зарубежных данных и собственных исследований было показано, что в случае сжигания низкосортных топлив, требующих «мокрой» системы сероочистки, себестоимость электроэнергии, выработанной на блоках мощностью 150–200 МВт с котлами с ЦКС, в среднем на 7,9 % ниже, чем на традиционных котлах. При этом затраты на эксплуатацию и ремонт примерно одинаковы. Затраты на топливо для котлов с ЦКС несколько ниже (более высокий КПД котла с ЦКС для низкорекреационных топлив и отсутствие подсветки мазутом), капитальные затраты – ниже в среднем на 7,4 %.

В Европе наибольший прогресс при внедрении котлов с ЦКС достигнут в последнее время в Польше – более 15 котлов для блоков мощностью свыше 100 МВт, из них: три блока по 235 МВт и еще три по 260 МВт. В 2009 г. введен в эксплуатацию блок мощностью 460 МВт с котлом с ЦКС на ТЭС в Логиже. Китай – самый крупный рынок использования технологии ЦКС. В 2013 г. пущен первый в мире блок мощностью 600 МВт с котлом с ЦКС. В настоящее время число работающих котлов с ЦКС в Китае приближается к 3000, включая 32 блока по 300 МВт, еще около 50 блоков по 300 - 350 МВт либо уже находятся в состоянии строительства, либо в скором времени планируется начать их строительство. Сооружается блок мощностью 660 МВт с одним котлом ЦКС паропроизводительностью 1900 т/ч с давлением пара 29,4 МПа и температурой 605/623 °С. Стремительное развитие технологии ЦКС в Китае стало возможным благодаря инвестиционным и исследовательским программам центрального правительства Китая. Активное развитие ЦКС инициировало большой объем исследований, которые привели к разработке новых подходов к технологии ЦС и реализации ее на практике [4].

В последнее время наметились две тенденции в развитии этой технологии. Первая из них характерна для энергетики Китая и ряда азиатских стран (прежде всего - Корея), которая связана с введением крупных энергоблоков на низкосортных углях. При этом важным является повышение параметров пара, стремление к удешевлению стоимости котлов и снижению затрат электроэнергии на собственные нужды. Вторая определяется способностью котлов с ЦКС эффективно сжигать широкую гамму топлив, включая различные виды биомассы и отходов. Важным является технология совместного сжигания местных топлив и угля. Эта тенденция характерна для ряда европейских стран.

Котлы с ЦКС наиболее приспособлены к эффективному и надежному сжиганию широкого диапазона топлив и топливных смесей, начиная от угля и биомассы и заканчивая различными видами отходов. В течении последних 15 лет некоторые котлы с ЦКС, спроектированные для сжигания угля, работали в условиях совместного сжигания с большими долями биомассы, а новые установки с ЦКС позволяют сжигать еще более широкий спектр отходов. В [5] проанализированы технико-экономические аспекты сжигания широкой гаммы топлив, а также возможности глубокого регулирования нагрузки блоков с котлами ЦКС. В последнее время в Китае произошло резкое ужесточение норм на вредные выбросы. Они являются самыми жесткими в мире. Для некоторых регионов Китая с 2015 года при новом строительстве нужно иметь выбросы от угольных котлов на уровне установок со сжиганием природного газа. Такие решения с выбросами оксидов азота 50 мг/м<sup>3</sup>, серы 35 мг/м<sup>3</sup> и частиц 5 мг/м<sup>3</sup> уже реализованы на одном из котлов с ЦКС в Китае [6].

Первый котел с ЦКС в России сооружен на блоке № 9 Новочеркасской ГРЭС. Котлоагрегат Пп-1000-24,5-565 АКТФ (модель ТПП-357) энергоблока №9 Новочеркасской ГРЭС предназначен для обеспечения паром заданных параметров паровой турбины К-330-23,5 производства ОАО «Турбоатом», г. Харьков (Украина). Котел прямоточный, газоплотный с уравновешенной тягой, П-образной компоновки, предназначен для сжигания Донецкого АШ и Кузнецкого угля марки Т. В качестве растопочного топлива используется природный газ. Первоначально предполагалось также сжигание шламов в смеси с АШ. Котел поставлен ОАО «ЭМАльянс» по инжинирингу компании «Сумитомо-Фостер-Уилер». Критические узлы котла и наиболее ответственное вспомогательное оборудование поставлены компанией «Сумитомо-Фостер-Уилер».

Приведен опыт пусконаладочных работ и начальной эксплуатации котла с ЦКС блока № 9 мощностью 330 МВт Новочеркасской ГРЭС [3, 7]. По данным испытаний фактический КПД котла был выше гарантийного и составил 92,65 %. Обеспечены гарантийные значения выбросов оксидов азота, как правило, они составляют около 200 – 250 мг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях и содержании кислорода в уходящих газах 6 %. Выбросы СО в основном близки к нулю. При подаче известняка обеспечивалось снижение выбросов оксидов серы с 2500 мг/м<sup>3</sup> до 400 мг/м<sup>3</sup> и ниже. Балансовые испытания котла на нагрузках 310, 260 и 194 МВт показали, что КПД брутто котла, определенное по обратному балансу, составило 92.30%, 91.58% and 90.24% соответственно, что выше проектных показателей.

В процессе первоначальной эксплуатации котла выявлен ряд недостатков, связанных с технологией сжигания, среди которых наиболее важными являются:

- высокая средняя температура слоя и большая неравномерность температуры по поверхности слоя приводит к аварийным остановам и шлакованию слоя;
- высокая температура на выходе из топки и увеличение температуры газов в циклонах, - приводит к аварийным остановам, возможной агломерации частиц в системе возврата и зольных теплообменниках INTREX, увеличивает тепло конвективной шахты, что приводит к необходимости впрысков в тракт промежуточного пароперегревателя и увеличивает температуру уходящих газов, снижая КПД котла;
- длительное время пуска котла из холодного состояния. Трудности с поддержанием режима в переходных процессах.

Одной из наиболее важных причин повышенной температуры слоя и неравномерности температур по слою, а также роста температуры газов в циклонах являются отклонения фракционного состава топлива от заданного компанией SFW [7]. Кроме того, пока еще не введена в постоянную эксплуатацию система подачи известняка.

Материал слоя излишне крупный, что не обеспечивает необходимый расход циркулирующего материала. Требуется более детальное изучение процессов с оптимизацией условий эксплуатации. При этом важным является также проведение исследований, которые позволят наилучшим образом реализовывать технологию сжигания топлив в циркулирующем кипящем слое на других объектах при использовании отечественного оборудования.

Выбор предпочтительных решений во многом определяется конкретными условиями сооружения новых блоков и требованиями по вредным выбросам. Важным условием оптимального использования технологии ЦКС является достижение не только существующих в РФ норм на вредные выбросы, но и перспективных норм без использования установок сероочистки и азотоочистки. Диверсификация поставок топлива является во многом решающим фактором в экономической конкуренции технологий сжигания твердых топлив на ТЭС.

#### Литература:

- 1 Leckner, B. Development of Fluidized Bed Conversion of Solid Fuels – History and Future [Text] / B. Leckner // Proc. of the 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on FBC, 2015, June 14–17. – Finland, Turku, 2015. – P. 2–11.
- 2 Zabetta, E. Role and Challenges of CFB in a Changing Energy Market [Text] / E. Zabetta, J. Kovacs, T. Eriksson // Proc. of the 12th Int. Conf. on CFB, May 23-26, 2017, Krakow, Poland, pp 77-83.
- 3 Рябов, Г. А. Использование технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое в мире и в России [Текст / Рябов Г. А., Антоненко Е. В., Крутицкий И. В., Фоломеев О. М., Беляев А.В. //Электрические станции- 2018, № 3, стр. 11-17.
- 4 Yue, G. The Formation of the CFB Design Theory and its Practice in China [Text] / Y. Guangx// Proc. of the 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on FBC, June 14-17, 2015.-Finland,Turku, 2015. - pp.12 – 22.
- 5 Nuortimo, K. Развитие технологии ЦКС для создания мощных энергоблоков [Текст]/ K. Nuortimo, T. Jantti, A. Khryasheva// Электрические станции- 2018, № 3, стр. 29-35.
- 6 Гао, Ц. Применение передовых технологий газоочистки, отвечающих экологическим требованиям Китая с ультранизкими выбросами вредных веществ : сб. докладов [Текст] / Ц. Гао, С.И. Чжан //3-ья Международная конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла», Москва, 28-29 июня 2016. –М.: ОАО «ВТИ», 2016. – С. 123-131

7 Ryabov, G. The first year experience of once through CFB boiler operation of 330 MWe unit [Text] / G. Ryabov, D. Kuchmistrov, E Antonenko, I. Krutitskiy, O. Folomeev, D. Melnikov, A. Beliaev //Proc. of 23-rd Int. Conf. on FBC, Seoul, Korea, May 13-17, 2018 , pp. 359 - 368.

## ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В АВТОНОМНОЙ ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С ВИХРЕВОЙ ТОПКОЙ

**Авторы:** Сакипов К.Е., Мерзадинова Г.Т., Сатбеков А.С., Шарифов Д.М., Лесбек Ш.Д.

**Организация:** Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилёва, г. Нур-Султан, Казахстан

Известно, что в энергетическом секторе Казахстана уголь, как твёрдое топливо, является стратегически важным и устойчивым видом топлива в течение нескольких десятилетий и по сей день, на долю которого входит почти 80% от общего количества выработанной тепловой и электрической энергии. По оценкам многих экспертов запасов угля в Казахстане, при нынешнем объёме потребления, хватает ещё как минимум на нескольких последующих десятилетиях. Как устойчивый вид топлива - уголь доминирует, также и в мировой энергетике, и во многих экономически развитых странах доля выработки электроэнергии на угле составляет подавляющим, к примеру, в США 52%, в Германии 54%, в Китае 72%. В последнее время, проблемы эффективного использования (сжигания) угля в качестве топлива в мировой энергетике, становятся всё более острее и актуальным, в связи с ряд важных причин. Прежде всего, ужесточением требований экологических проблем (уменьшением парниковых и других загрязняющих выбросов), ограниченные запасы самого угля и увеличение энергетических потребностей во всем мире и другие.

Как правило, среди различных методов получения энергии, особенно при сжигании угля (в ТЭС, промышленных производствах и в других источниках) наносится наиболее экологический ущерб. Поэтому, особенные «тревоги» бьются именно над задачей снижения экологического ущерба, т.е., уменьшением загрязняющих газовых выбросов (очисткой дымовых газов и утилизацией углекислого газа), являющейся основными антропогенными факторами глобального потепления. Многие ведущие мировые лидеры в этой области (энергетические компаний, ученые) ведут интенсивные работы и исследования по снижению этих выбросов и создания более эффективной и «чистой» угольной электростанции.

В рамках настоящего доклада приводятся результаты экспериментального испытания, разработанного (в рамках НИОКР) водогрейного твёрдотопливная котельная установка (КУ) с вихревой топкой.

При разработки новых водогрейных КУ, работающих на твёрдом топливе (угле), наибольшее предпочтение отдаётся именно механизмам улучшения процессов горения

угля в топках, его физико-химическому свойству, способу приготовления и подачи угля в топке. Безусловно, важную роль при этом, играет подготовка более точных методик тепловых расчётов, оптимизация процессов горения, оценка выбросы газов и других продуктов горения с использованием современных специализированных пакетов прикладных программ и процессов компьютерного моделирования. Многие динамические процессы в топках КУ при сжигании угля (время и скорости выходы летучих из топлива, горения углерода, динамика термического разложения и др.) решаются, именно численными моделированиями.

Разработка и создание вихревых топок позволяет удержания частицы пылеугольного топлива в активной зоне топочной камере до момента их эффективного и полного выгорания. При слоевых топках, как правило, имеет место значительные недогоревших топлива и соответственно, большой унос мелких частиц и потери тепла. Поэтому, целью проведения численных расчетов должно являться как качественные показатели (выявление общей картины аэродинамической обстановки), так и количественные - её детализация и выявление определяющих факторов по организации вихревого течения [1].

Схемы поперечного сечения разработанного опытного образца твёрдотопливной КУ с вихревой топкой представлены на рисунке 1. Основных блоков КУ составляют: системы топливоподготовки и топливоподдачи, включающую в себя: шнековый питатель, бункер подачи топлива и мельницу (дробилку), мотор-редуктор, магнитный металлоуловитель, вихревая топка с дополнительной камеры дожига (необходимый для полного сжигания различного сорта твердого топлива—угля), 3-х секционный теплообменник (вертикального типа), вентиляторы первичного и вторичного воздуха, дымоход и др. Наличие магнитного металлоуловителя, прикрепленного к боковой части бункера для предотвращения попадания металлических частей в дробилку, обеспечивает безопасность и долговечность работы котла. Собраны все узлы, необходимые для работы котла, оптимизированы блоком автоматического регулирования.

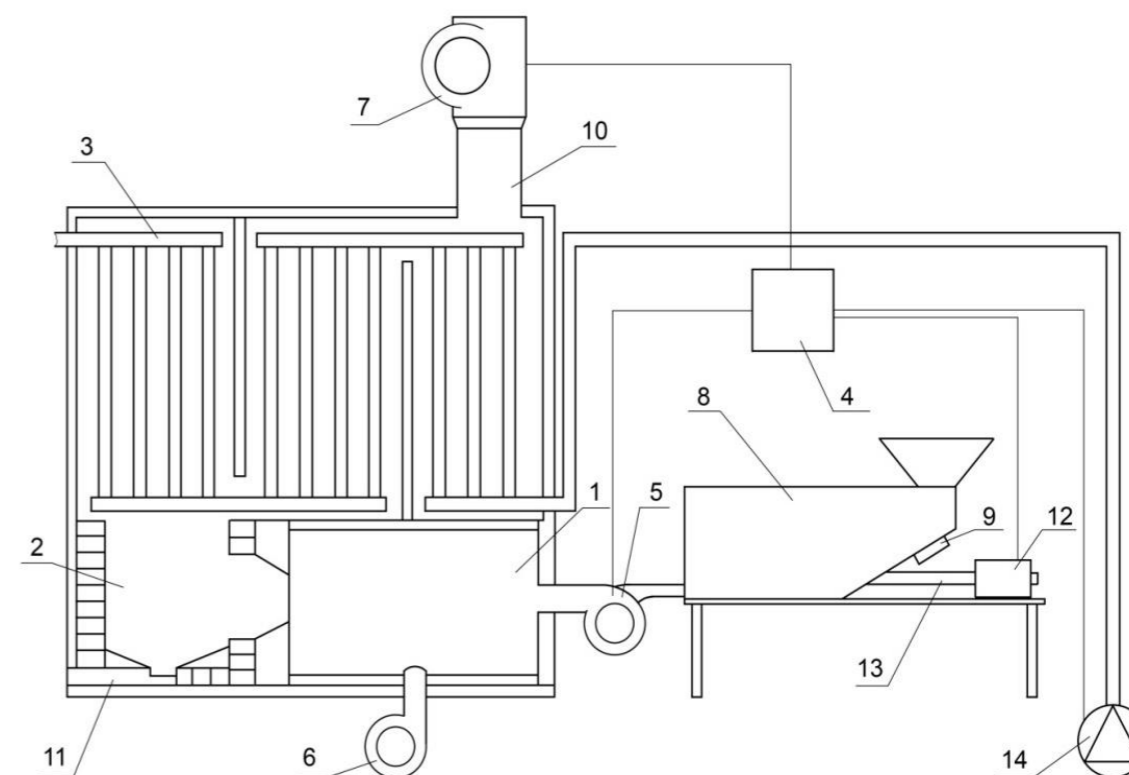


Рисунок 1 – Схема поперечного разреза котла: 1 – топка; 2 – дожигатель; 3 – теплообменник; 4 – щит управления; 5 – мельница (дробилка); 6 – вентилятор; 7 – дымосос; 8 – бункер; 9 – магнитный металлоуловитель; 10 – дымоход; 11 – шлакосборник; 12 – мотор-редуктор; 13 – шнек; 14 – циркуляционный насос

Внедрение автоматизированных систем контроля и управления, оптимизируя процессы работы (подачи пылеугольного топлива, процессов горения в топке), повышает эффективность (КПД котла) и контроль над выбросами. Автоматизация процессов топливоподдачи, в зависимости от объема бункера и скорости подачи топлива (от 3-х и более суток), может сэкономить - заменить физические силы работников котельных и, соответственно, принести экономические выгоды для собственников котельных. Основные технические параметры разработанной твёрдотопливной КУ с вихревой топкой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики ВТКУ с вихревой топкой.

Наименование показателей	Значение
Мощность, МВт	1,2
Вид топлива	Уголь

Расход топлива, кг/ч	до 170 (регулируется)
Время растопки, ч	< 60 мин.
КПД, % (брутто)	Более 90
Температуры теплоносителя, вход/выход, °С	70 /90
Рабочее давление воды, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ),	0,067 не более
Допустимая температура воды при подключении установки к системе отопления, °С	70
Объем топочной камеры, м <sup>3</sup>	0,6 не менее
Рабочая температура в топочном блоке, °С: – на выходе из топки	1150-1300
Температура уходящих газов за установкой, °С	185 – 198
Обогреваемая поверхность нагрева установки, м <sup>2</sup>	28
Объем теплообменной камеры установки, м <sup>3</sup>	2,5 м <sup>3</sup> (наружный)
Объем теплоносителя в установке, м <sup>3</sup>	700 -800 литров
Высота газоотводной трубы (рекомендуемая), м	5,5 - 6
Диаметр газоотводной трубы, мм	300 -320
Бункер для загрузки топлива (угля): – объем, м <sup>3</sup>	2 -3 (возм. рег).
Степень автоматизации: – автоматизация подачи топлива; – скорость подачи, кг/час	-Шнековая -3 кг/мин
Мельница: – размеры фракций частиц топлива, мм;	-Шнековая - до 0,50 мм
Дополнительная информация по автоматизации котельной установки	Установка реле времени, термодатчиков
Габаритные размеры установки, м: – длина – ширина – высота	3,5 2,3 3,8
Масса установки, тонн	до 5
Масса установки (металлических частей), т,	4,3 не более
Другое вспомогательное оборудование - Мощность: Мотор редуктор, кВт Циркуляционный насос, кВт	1,5 2,2

Вентилятор наддува, кВт	3
Вентилятор подачи топлива, кВт	5,5

Литература:

1. Якимова И.С., Фурсов И.Д., Жуков Е.Б. Исследование сжигания низкокачественного угля.//Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии, №2 (13), 2013, стр.173-178.

## ОПЫТ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЭС И ТЭЦ В УКРАИНЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**Авторы:** Мирошниченко Е.С., Чернявский Н.В., Дунаевская Н.И.

**Организации:** ЧАО «Техэнерго», г. Львов Украина, «Институт угольных энерготехнологий» НАН Украины, г. Киев

Украина и Казахстан делят 7-8 места в мире по разведанным запасам угля. До 2013 года в Украине добывалось более 85 млн. т каменного угля и антрацита в год, а ТЭС, основу генерирующих мощностей которых составляли пылеугольные котлоагрегаты, вырабатывали более 40% электроэнергии. С другой стороны, в 70-90-е годы прошлого века, в период поставок дешевого российского газа, многие угольные котлы ТЭЦ и котельных были переведены на сжигание газа.

Прекращение поставок донецкого антрацита и тощего угля, которые являются проектными для половины котлоагрегатов ТЭС и ряда ТЭЦ, снизило добычу угля на 60%, и привело к резкому удорожанию газа с необходимостью сокращения его использования в тепловой энергетике. Была предопределена необходимость снижения выбросов пыли, оксидов азота и серы до новых европейских нормативов и принятия курса на декарбонизацию тепловой энергетике. Ответы на эти вызовы требуют строительства современных высокоэффективных котлоагрегатов с оснащением системами глубокой пыле-, серо- и азотоочистки. Позже, не осталось крупных котельных заводов, в связи, с чем и с учетом обеспечения окупаемости проектов актуальной является реконструкция котлоагрегатов с максимальным использованием существующего оборудования.

В 2015-2019 гг. ИУЭ НАН Украины и/или ЧАО «Техэнерго» принимали участие в разработке и реализации следующих проектов:

- перевод двух антрацитовых котлоагрегатов Еп-230-10-510 паропроизводительностью 230 т/ч Мироновской ТЭС на сжигание газового угля с полным сохранением существующего оборудования;
- реконструкция двух антрацитовых котлоагрегатов ТПП-210А блоков 300 МВт Трипольской ТЭС с переводом на сжигание газового угля;
- реконструкция двух газомазутных котлоагрегатов ПК-19-2 1-й очереди Черкасской ТЭЦ с переводом на сжигание газового угля;
- разработка ТЭО комплексной реконструкции Черниговской, Дарницкой, Краматорской ТЭЦ, Харьковской ТЭЦ-2 «Эсхар» с переводом антрацитовых и

газомазутных котлоагрегатов паропроизводительностью 160-230 т/ч на сжигание газового угля;

- реконструкция 4 газомазутных котлоагрегатов «Радиант» производства Бабкок-Вилкокс паропроизводительностью 24 т/ч Хоростковского сахарного завода с переводом на сжигание растительной биомассы и/или газового угля.

В частности, при реконструкции котлоагрегатов ТПП-210А Трипольской ТЭС были применены такие оригинальные технические решения, как использование вентилятора горячего дутья в качестве дымососа рециркуляции дымовых газов в мельницы и пылеподача высокой концентрации под разрежением с вводом парового эжектора пыли в центральный канал существующих вихревых горелок. На одном из котлов была сохранена схема сброса отработанного сушильного агента в сбросные горелки, что позволило существенно расширить диапазон регулирования нагрузки без подсветки и реализовать в этом котле переход на сжигание газового либо тощего угля с изменением только режимных параметров пылесистемы.

Котлоагрегаты ПК-19-2 1-й очереди Черкасской ТЭЦ изначально были спроектированы для сжигания тощего угля, но из-за низкой эффективности более 40 лет назад переведены на сжигание газа. При их реконструкции была применена схема пылесистемы на основе среднеходных кольцево-шаровых мельниц польского производства под давлением с прямой подачей пыли в вихревые горелки, что позволило повысить температуру факела и обеспечить полноту выгорания угольной пыли без применения подсветки.

При разработке ТЭО реконструкции Краматорской ТЭЦ была детально проработана оригинальная схема комплексной газоочистки в составе компактных центробежно-рукавных циклофильтров, монтируемых в корпусах существующих низкоэффективных скрубберов Вентури, системы СНКВ и установки аммиачно-сульфатной десульфуризации с получением на выходе полезного продукта – сульфата аммония. Такая схема позволяет подавать аммиачную воду в систему СНКВ с полутора-двукратным избытком и повысить эффективность азотоочистки с 60 до 90%, а также доочищать уходящие газы от мелкой пыли с обеспечением выброса пыли менее 20 мг/нм<sup>3</sup>.

Перечисленные проекты, основанные на использовании угля, решают перспективные задачи тепловой энергетике только частично. Комплексное решение задач расширения топливной базы, перехода на возобновляемые источники, декарбонизации и кардинального снижения вредных выбросов в тепловой энергетике может быть обеспечено при использовании твердого биотоплива, в частности, отходов сельскохозяйственной биомассы (лузга, солома, стебли подсолнуха и пр.). Вместе с тем

твердое биотопливо имеет ряд особенностей, в том числе низкую калорийность, высокий удельный объем продуктов сгорания, пониженные температуры шлакования, из-за которых его сжигание в чистом виде в угольных котлах без реконструкции невозможно.

Так, на ТЭС «Дракс» (Великобритания) с пылеугольными энергоблоками 600 МВт много лет биотопливо сжигалось совместно с углем (доля биотоплива – 12% по теплу), и только после реализации глубоких конструктивных изменений котлов стал возможен полный переход на биотопливо. ИУЭ НАН Украины также разработал для Трипольской ТЭС эскизный проект оснащения котлов ТПП-210А дополнительным оборудованием для совместного сжигания 15% биотоплива с антрацитом и/или газовым углем. Однако логистические проблемы снабжения биотопливом унифицированного качества энергоустановок большой единичной мощности в Украине пока не решены, что делает более актуальным его применение для котлов средней мощности ТЭЦ и котельных, которые в этом случае также требуют реконструкции.

В 2019 г. при участии специалистов ИУЭ НАН Украины и ООО «Стальсервис» были реконструированы с переводом на сжигание биотоплива (пеллет лузги подсолнуха) котлы «Радиант» ТЭЦ Хоростковского сахарного завода паропроизводительностью 24 т/ч. Изначально котлы были оснащены решетками прямого хода и рассчитаны на сжигание антрацита, но более 40 лет назад переведены на сжигание газа. При реконструкции на основании расчетных исследований необходимого перераспределения теплосъема, обеспечения бесшлаковочного режима конвективных поверхностей и защиты решетки от перегрева при сжигании высокорекреационного низкокалорийного биотоплива с высоким удельным объемом продуктов сгорания и низкой температурой шлакования была изменена геометрия топочной камеры, увеличена площадь водяного экономайзера, уменьшена площадь воздухоподогревателя (рис. 1). В отличие от известных способов сжигания биотоплива в котлах подобного типа, увеличения объема топочной камеры, оснащения ее предтопками системы Померанцева или Шершнева не понадобилось.

Другие особенности проекта:

- проект реализован за 9 месяцев с параллельным проектированием;
- реконструкция проводилась на 4 котлах одновременно;
- из импортного оборудования использована только современная цепная решетка прямого хода;
- для каждого котла сооружена новая двухбункерная система топливоподачи, позволяющая сжигать биотопливо совместно или отдельно с торфом или дешевым низкокалорийным каменным углем, что существенно расширяет топливную базу и повышает экономичность эксплуатации;

- котлы оборудованы современной двухступенчатой пылеочисткой;
- реализована полномасштабная система автоматизации всей ТЭЦ с минимумом персонала и возможностью полностью автоматической работы при обеспечении подачи топлива в бункера.

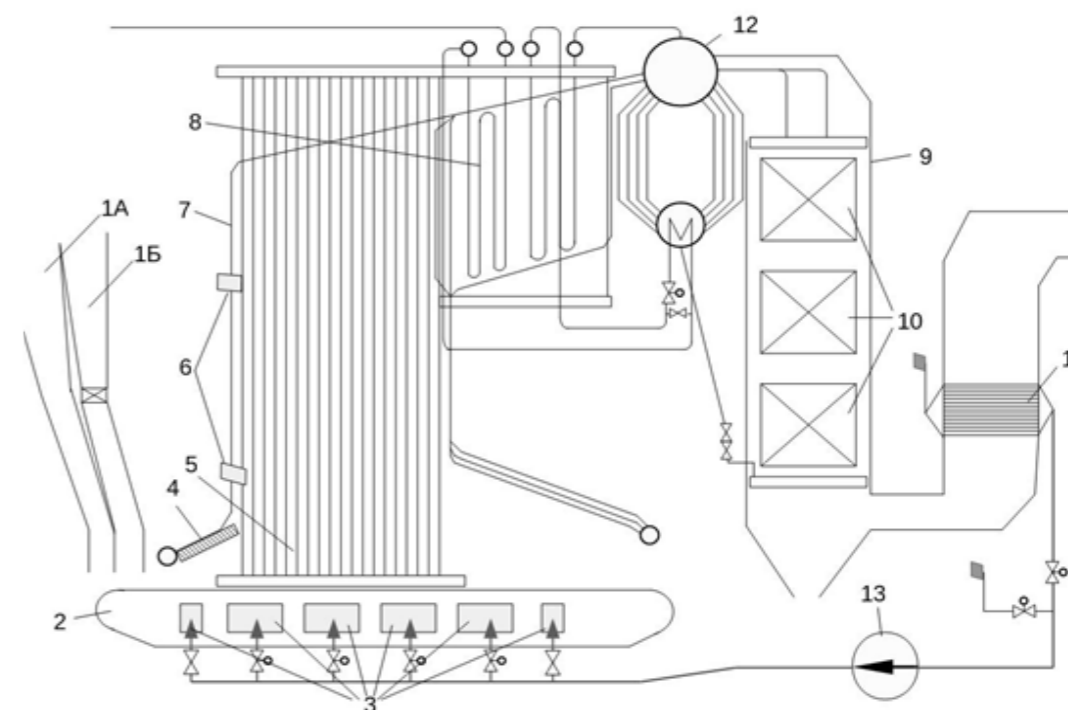


Рис.1 – Котел «Радиант» после реконструкции: 1А – бункер низкорекреационного компонента топливной смеси; 1Б – бункер высокорекреационного компонента топливной смеси; 2 – цепная решетка прямого хода; 3 – распределительное устройство первичного воздуха; 4 – передний свод; 5 – зона активного горения; 6 – сопла вторичного воздуха и рециркуляции газов; 7 – экраны топочной камеры; 8 – пароперегреватель; 9 – конвективная шахта; 10 – экономайзер; 11 – воздухоподогреватель; 12 – барабан котла; 13 – дутьевой вентилятор.

Осенний сезон 2019 г. котлы прошли безаварийно, устойчиво работая на пеллете из лузги подсолнуха и газовом угле с калорийностью 4400-4500 ккал/кг, при их отдельной или совместной подаче (уголь – нижний, пеллета – верхний слой на решетке). При сжигании пеллет мехнедожог в уносе практически отсутствовал, в связи с чем отложения золы на конвективных поверхностях были рыхлыми и легко самоочищались за несколько часов работы на газовом угле. Интерес к тиражированию данного опыта обусловлен

наличием в Украине нескольких тысяч подобных котлов, которые в настоящее время сжигают природный газ.

Успех реализованных проектов во многом объясняется тем, что в каждом случае применялись не типовые, а оригинальные технические решения, учитывавшие существующую и перспективную топливную базу, состояние существующего оборудования и возможности его максимального использования в новом качестве, возможности отечественных предприятий. Нам представляется, что украинский опыт малозатратной реконструкции котлоагрегатов паропроизводительностью от 24 до 950 т/ч с улучшением технико-экономических и экологических показателей, в том числе с переводом на низкокалорийный каменный уголь и на твердое биотопливо, в условиях отсутствия крупных котельных заводов был бы полезен и для Республики Казахстан.

## ПОЛУЧЕНИЕ АДСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ КАЗАХСТАНА НА ОПЫТНО-ПОЛУПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Казанкапова М.К., Касенова Ж.М., Наурызбаева А.Т., Кемелова Б.А., Каден А.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан

Последние десятилетия ознаменовались всплеском научной активности по разработке и изучению углеродных материалов (УМ). Это нашло отражение в целенаправленном синтезе аллотропных форм углерода (карбинов, фуллеренов, нанотрубок, циркуленов и др.), а также в создании широкого спектра пористых материалов в ряду смешанных (переходных) форм углерода, представляющих практический интерес в качестве адсорбентов, катализаторов и носителей для катализаторов, подложки в источниках тока нового поколения (литий-ионных аккумуляторах, суперконденсаторах, ионисторах и топливных элементах) и т.д. [1-4].

В среднесрочной перспективе казахстанский рынок активированного угля будет расти не менее чем на 10-12% в год, в первую очередь ввиду ужесточения экологических норм. Ожидается, что к 2021 году объём рынка достигнет 10,7 тыс. тонн. Помимо высокой потребности для Казахстана в активированном угле в целом, экспертами отмечается факт роста потребности активированного угля высокого качества [5]. Высокое качество активированного адсорбента зависит в первую очередь от используемого сырья, а также технологий для его производства. В Казахстане, на фоне значительной импортозависимости рынка активированного адсорбента, в том числе высококачественного, возникает острая необходимость развития отечественного производства, а также внедрения на них новейших технологий переработки. Как известно, основной характеристикой адсорбционной способности материалов при адсорбции газов, пара, твердых и жидких веществ является развитость поверхности, общий объем пор, распределение пор по размерам, высокая удельная поверхность, что придает им ряд уникальных свойств. Являясь прекрасным сорбционным материалом уголь может использоваться для очистки газов, жидких сред, в т.ч. сточных вод от нефтепродуктов, фенолов и солей тяжелых металлов.

Целью работы является исследование и разработка технологии процесса получения активированных углей (адсорбентов) с высокой добавленной стоимостью на основе отечественного сырья для очистки газовой фазы от кислых компонентов и сточных вод.

Образцы активированного угля были получены в ТОО «Институт химии угля и технологии» (г. Нур-Султан) карбонизацией (при 700 °С в среде азота) и активацией

водяным паром в течение 1 часа. Для получения активированных адсорбентов предварительно исходный продукт измельчали до фракции 0,1 мм, затем из него получали цилиндрические образцы (d=0,2-0,3 см) на экструдере. Далее продукт проходил стадию термической обработки (карбонизации) и активации в инертной среде азота на вращающей барабанной печи (с объемом 50-100 кг).

Объектом исследования являются углеродные материалы из углей месторождения «Шоптыколь», «Сарыколь», «Сарыадыр» (угольные пласты «Пятиметровый», «Спутник», «Надежный»), «Кушмурын», «Мамыт», «Шубаркуль» (разрез Центральный), «Ой-Карагай».

В результате карбонизации и активации получен: активированный уголь (адсорбент), газ и каменноугольная смола, которая далее использована для получения углеродных нановолокон. Генераторный газ полученный при карбонизации и активации подается в газораспределительное устройство (ГРУ), далее на горелки для нагрева барабанной печи. Вода после очистки используется для стадии активации водяным паром. Поэтому представленная схема получения углеродных материалов выгодно с экономической и экологической стороны, так как используется комплексная, безотходная технология.

Влажность, зольность и летучесть адсорбентов определяли на термогравиметрическом анализаторе «Thermoster Eltra». Насыпную плотность, рН водной вытяжки, адсорбционную активность по метилоранжу определяли в соответствии с [6]. Адсорбционные характеристики образцов (удельная площадь поверхности, удельный объем пор по предельному заполнению) изучали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Исследование элементного состава образцов проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на приборе SEM (Quanta 3D 200i) с приставкой для энергодисперсионного анализа от EDAX. Результаты исследования физико-химических свойств, элементного состава полученных адсорбентов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты физико-химических характеристик адсорбентов (АУ) на основе углей месторождения Казахстан

Наименование АУ	W <sub>гт</sub> , %	A <sub>г</sub> , %	V <sub>d</sub> , %	Суммарный объем пор по воде, см <sup>3</sup> /г	Насыпная плотность ρ, г/см <sup>3</sup>	рН водной вытяжки	Адсорб. актив. по метилоран	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г
-----------------	---------------------	--------------------	--------------------	---	---	-------------------	-----------------------------	---	--

							жу, мг/г		
«Шоптыколь»	0,56	25,08	27,96	0,448	0,536	9,51	57,5	348,99	-
«Сарыколь»	0,75	70,52	5,39	1,099	0,640	9,20	26,00	179,39	-
«Пятиметровый»	0,62	27,14	4,05	0,420	0,561	7,30	26,15	148,53	0,064
«Спутник»	0,26	53,34	5,11	0,570	0,603	8,26	20,05	148,85	0,064
«Надежный»	0,76	40,93	6,71	0,660	0,648	8,47	22,35	294,44	0,126
«Мамыт»	1,25	32,13	14,14	0,608	0,697	8,22	41,50	364,59	0,156
«Шубаркуль»	3,30	11,25	5,50	0,864	0,637	8,53	35,00	442,81	-
«Кушмурун»	1,25	38,74	8,32	0,560	0,517	10,94	20,00	343,63	0,147
«Ой-Карагай»	2,83	26,571	19,12	0,5	0,603	10,34	52,50	266,86	-
«Богатырь»	1,93	32,37	7,30	0,67	0,664	6,25	36,80	11,552	0,005

Таблица 2 - Результаты исследования элементного состава адсорбентов (АУ) на основе углей месторождения Казахстан

Наименование	Содержание элементов, мас. %										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Ti	S
«Шоптыколь»	60,69	19,44	-	0,58	5,29	10,09	1,05	0,75	1,60	-	-
«Сарыколь»	52,42	19,81	0,44	0,47	4,87	10,32	1,85	1,39	7,14	0,55	0,04
«Пятиметровый»	88,60	8,22	-	-	0,22	1,43	-	-	-	1,32	0,21
«Спутник»	59,98	22,62	-	-	3,73	13,67	-	-	-	-	-
«Надежный»	61,11	21,17	-	-	8,05	9,24	0,43	-	-	-	-
«Мамыт»	77,60	9,94	0,37	-	3,15	2,69	-	1,97	3,45	-	0,82
«Шубаркуль»	87,58	9,92	0,14	0,17	0,55	0,54	-	0,64	0,31	-	0,17
«Кушмурун»	82,96	5,77	0,41	0,91	1,21	0,47	-	6,51	0,92	-	0,30
«Богатырь»	78,81	12,30	-	-	-	2,58	4,85	-	-	1,30	-

В аккредитованной лаборатории ТОО «НИЦ Уголь» (г.Караганды) изучены основные характеристики полученных адсорбентов согласно по СТ РК 2246-2012 (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты исследований физико-химических характеристик активированных адсорбентов

№ п/п	Наименование показателя	Ед.измер.	Значение показателя адсорбентов		
			«Сарыадыр»	«Шоптыкол»	«Кушмурын»
1	Массовая доля воды	%	0,91	2,24	0,86
2	Массовая доля золы	%	41,59	25,53	21,69
3	Структурная прочность	%	86,72	87,63	92,25
4	Суммарный объем пор по воде	см <sup>3</sup> /г	0,27	0,44	0,42
5	Адсорбционная	%	15,55	19,58	30,93

активность по йоду					
6	Насыпная плотность	г/см <sup>3</sup>	0,86	0,54	0,60
7	Массовая доля хлора	%	0,01	0,01	0,26
8	Массовая доля мышьяка	%	0,0002	0,0006	0,0003
9	Массовая доля общей серы	%	0,52	0,58	3,64
10	Гранулометрический состав	%			
	Более 5 мм		22,97	18,61	13,91
	3-5 мм		72,88	73,26	61,78
	1-3 мм		2,71	6,82	14,88
	0,1-1 мм		0,47	0,36	2,28
	Менее 0,1 мм		0,97	0,95	1,15
	Итого		100,00	100,00	100,00

Полученные активированные адсорбенты апробированы для очистки сточных канализационных вод, взятых в ГКП «Астана су арнасы» (г. Нур-Султан) (таблица 4). Место отбора проб: распределительная камера после предварительной механической очистки. Химический анализ сточных вод до (контроль) и после очистки адсорбентами в лабораторных адсорбционных установках проведен в аккредитованной аналитической лаборатории канализационных очистных сооружений ГКП «Астана су арнасы», в которой были определены основные показатели очистки сточных вод. Рассчитаны также степени очистки по основным показателям (для сравнения адсорбционных свойств).

Таблица 4 - Результаты химического анализа сточных вод «Астана су арнасы» до и после очистки адсорбентами

Наименование показателей	Степень очистки, в %							
	«Шопты -коль»	«Сары-коль»	«Пягитме тровой»	«Спутник»	«Надежный»	«Мамыт»	«Ой-Карагай»	«Кушму-ын»
pH	8,82	8,70	7,35	7,85	7,9	8,5	9,00	10,10
БПК, мгО/дм <sup>3</sup>	86,31	72,63	87,77	70,00	88,44	84,44	36,84	84,24
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	61,53	34,23	52,75	57,14	68,29	52,75	14,61	29,43
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	73,22	67,58	65,51	93,11	73,79	69,65	59,94	72,31
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	46,29	23,14	3,74	2,14	3,74	0,13	-	-
Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>	63,74	56,99	10,88	14,23	22,04	11,72	48,16	89,81

Нитриты, мг/дм <sup>3</sup>	57,61	58,27	35,03	13,63	29,92	42,33	45,03	42,22
Нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	79,62	64,81	21,42	18,75	12,5	30,35	40,74	47,61
Железо, мг/дм <sup>3</sup>	81,74	76,58	56,31	66,11	76,69	61,16	22,61	56,52
Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	22,52	46,92	33,93	35,68	47,65	65,34	79,87	93,32
Цинк, мг/дм <sup>3</sup>	24,75	14,35	8,16	33,66	-	-	29,20	66,66
Медь, мг/дм <sup>3</sup>	43,47	47,82	9,67	16,00	22,58	41,93	-	6,66
СПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	25,35	29,57	39,91	81,31	66,94	50,10	11,97	13,64
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	65,25	56,16	88,19	94,73	95,13	92,36	55,84	18,00

Анализ полученных данных показал, что после очистки сточных вод значения всех химических показателей для всех адсорбентов снижаются, особенно таких показателей, как БПК, взвешенные вещества, фосфаты, железо и нефтепродукты. Данные результаты исследования показывают, что полученные образцы на основе углеродных материалов можно рассматривать перспективными, в частности, в качестве адсорбентов для очистки жидких сред.

Таким образом, в результате высокотемпературных процессов карбонизации (в инертной среде) и активации (водяным паром) углей Казахстана, обладающий более развитой и упорядоченной поверхностной структурой, а также более высокими адсорбционными свойствами. В связи с этим активированные адсорбенты можно рассматривать перспективными, в частности, в качестве адсорбента для очистки жидких сред и газа. На сегодняшний день самый дорогой активированный адсорбент Казахстан импортирует из Японии – 16 тыс. \$ США за одну т. Из России, как основного импортера, активированный уголь ввозится по стоимости в среднем 1103 \$ за 1 тонну продукции. Крупномасштабное использование углеродных адсорбентов в целях охраны окружающей среды (очистка стоков, газовых выбросов, загрязненных почв) требует расширения производства АУ из дешевых видов органического сырья: ископаемых твердых топлив, различных природных и техногенных органических отходов. Налаженное производство АУ позволит обеспечить водное хозяйство, ЖКХ и воздушный бассейн РК эффективными и недорогими наноматериалами отечественного производства, что будет способствовать улучшению окружающей среды и водных ресурсов, что в итоге благоприятно скажется на здоровье населения.

Литература:

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. М.: МГТУ. Т. I. Р.470
2. Рыбак Л.В., Алексеев Г.Ф., Бурцев С.В., Ефимов В.И., Корчагина Т.В., Шапранко Д.С. // Уголь – Российский угольный журнал. 7: 62. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-7-62-67>
3. Hoang V.C., Hassan M., Gomes V.G. Coal derived carbon nanomaterials–recent advances in synthesis and applications // Applied Materials Today 12: 342-358.
4. Moothi K., Iyuke S.E., Meuyappan M., Falcon R. Coal as a carbon source for carbon nanotube synthesis // Carbon. 50 (8): 2679-2690.
5. Отчет по результатам исследования «Производство активированного угля, в том числе из отходов деятельности сельского хозяйства РК». Алмата. 2017 г. 47 с.
6. Кабулов А.Т., Нечипуренко С.В., Ефремов С.А. // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5(31). С. 527–531.

**СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДАХ  
УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА**

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Семенова Я.А., Урлибай Р.К., Болат О.С.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан.

Казахстан занимает девятое место среди самых больших государств и на территории республики добывают 99 элементов из периодической системы Менделеева. Главным ресурсом являются горючие полезные ископаемые, а именно уголь. В последнее время угольные месторождения всё чаще стали рассматривать не только в качестве энергетического сырья, но и как источник попутных ценных элементов. Это связано с ростом потребления металлов для нужд промышленности. Также установлено, что золошлаковые отходы могут содержать высокие, иногда промышленно значимые концентрации ценных элементов. В 2017 году Казахстан занял восьмое место в мире по объему доказанных запасов угля. При этом, более 90% разведанных запасов угля сосредоточены на севере и в центральной части Казахстана. Известно 12 угольных бассейнов и около 400 обособленных месторождений и углепроявлений. В качестве изучения были выбраны наиболее крупные из разрабатываемых в настоящее время месторождений – Карагандинский, Экибастузский, Каражыра, Майкубенский и Торгайский бассейны.

К Карагандинскому синклинию, который находится в средней части Центрального Казахстана, приурочен разрабатывающийся систематически с 1931 г. крупный Карагандинский каменноугольный бассейн, заключающий почти все запасы коксующихся углей Казахстана [2]. Для этих углей характерны повышенные концентрации Ge, Ga, Sc, REE (редкоземельные элементы), которые, в основном, встречаются в богатых витринитом углях долинской и тентекской свит. Низкая зольность углей бассейна обуславливает высокие содержания элементов-примесей в золе угля. По данным анализа проб углей, проведенного методами ICP MS и ИНАА, концентрации Sr, Sc, Yb, Cr, Ba, Hf, Hg в золе превышают уровень кларка (табл.1) и первые три элемента достигают возможно промышленного значения. При пылевидном сжигания угля свыше 1200 – 1600°C часть редкоземельных (Ga, In, Tl, Ge, Sn, Pb) и благородных металлов (Au, Pt, Pd) выносятся из зоны высоких температур дымовыми газами и при 120-150°C концентрируются на электрофильтрах.

Экибастузский угольный бассейн отличается уникальными мощностями пластов энергетических углей. Угли бассейна характеризуются высокими содержаниями Sr, Eu,

Tb, Hf, Sc, но уровни накопления не достаточно высоки, чтобы рассматривать их как возможный источник ценных металлов. В связи с высокой зольностью углей бассейна, содержание этих элементов в золе угля существенно ниже среднемировых данных (табл.1). Это ограничивает перспективы переработки Экибастузских углей.

Золы углей месторождения Каражыра характеризуются вышекларковыми концентрациями Sc, Cr, Co, Rb, Sr, Ba, La, Sm, Yb, Zn, Au, Hg. Особенно существенны уровни накопления в отдельных пробах Sr (5139,1 г/т), Co (2026 г/т), Sc (172 г/т), Rb (276, 8 г/т), Au (722 мг/т).

В пределах Майкубенского буроугольного бассейна были изучены месторождения Сарыколь и Талдыколь. Содержание элементов-примесей в углях месторождения Сарыколь в основном ниже соответствующих кларков для бурых углей. Незначительные превышения над кларком установлены для Cr, Co, Zn, As, Sr, Ag, REE. А для золы данного месторождения можно выделить только Rb и Ba, концентрации которых выше по сравнению с другими элементами. Для углей месторождения Талдыколь характерно накопление редкоземельных элементов цериевой группы и Yb. Несмотря на высокую зольность, золы углей также значительно обогащены этими элементами, по сравнению с зольным кларком (табл.1). Так, содержание иттербия при перерасчете на золу достигает промышленно значимой величины.

Таблица 1 – Среднее содержание элементов-примесей в золе угольных месторождений Казахстана, г/т [1]

Элемент	Бассейны, месторождения						Кларк для золы бурых углей [3]	Кларк для золы каменных углей [3]	Минимальное возможно промышленно значимое содержание [4]
	Экибастузский	Карагандинский	Каражыра	Талдыколь	Сарыколь	Торгайский			
Ca*	2,74	1,90	5,12	3,28	2,96	4,94	–	–	н.д.
Sc	23,3	<b>62,3</b>	<b>40-172,3</b>	37,73	32,81	35,3	24	22	<b>50</b>
Cr	19,9	116,61	262,59	144,90	68,91	315,7	120	82	<b>7000</b>
Fe*	3,50	2,01	3,67	3,49	4,97	24,5	–	–	н.д.
Co	16,4	43,81	<b>122,6-2026</b>	34,73	27,78	70,8	37	26	<b>100</b>
Zn	н.д.	н.д.	782,91	147,65	144,38	356,4	170	110	<b>2000</b>
As	6,6	н.д.	2,35	15,60	54,60	60,6	46	48	н.д.
Br	32,9	32,9-145,8	35,5-253,8	16,97	14,16	н.д.	32	32	н.д.
Na*	0,29	0,79	1,74	0,98	0,77	н.д.	–	–	н.д.
Rb	9,03	<0,6	<b>40-276,8</b>	81,50	109,40	6,83	130	48	<b>175</b>
Sr	419	<b>1667-2854</b>	<b>3967-5139</b>	602	809	932	730	750	<b>2000</b>

Ag	0,42	<0,5	<0,5	1,27	1,40	1,04	0,63	0,59	<b>5</b>
Cs	1,70	5,86	2,62	5,3	10,06	0,8	8	5,2	<b>150</b>
Ba	749	1663,94	2517,53	1183	1231	125	980	900	н.д.
La	31,3	57,90	126,30	54,42	39,91	30	76	62	н.д.
Ce	72,0	128,70	275,31	135,14	106,02	70,54	140	120	н.д.
Nd	н.д.	н.д.	143,82	63,25	39,6	38,87	–	–	н.д.
Sm	7,73	17,11	52,70	11,86	10,73	8,37	14	11	н.д.
Eu	2,19	5,20	11,89	3,42	2,75	2,5	2,6	2,3	н.д.
Tb	1,71	3,11	7,17	2,69	1,76	2	2,1	2,0	н.д.
Yb	5,45	<b>4,9-8</b>	<b>10,2-32,2</b>	<b>8,18</b>	5,88	<b>11,9</b>	6,8	5,5	<b>7,5</b>
Lu	1,02	2,18	2,75	1,24	1,02	1,9	1,3	1,1	н.д.
Hf	6,93	14-25,3	7,11	8,13	6,93	7,7	9	7,5	<b>25</b>
Au**	2,40	<0,01	<b>3,75-723</b>	7,38	4,58	0,2	24	20	<b>100</b>
Hg	н.д.	12,5	9,9	0,2	0,3	0,34	0,87	0,62	н.д.
Th	7,20	11,51	10,31	12,61	14,80	2,85	23	19	н.д.
U	2,71	6,32	4,57	<b>9,4-127,4</b>	4,20	2,16	15	16	н.д.

Примечание: н.д. – нет данных; жирным шрифтом выделены содержания, превышающие минимальное возможно промышленно значимое содержание; \* - %, \*\* - мг/т.

В Талдыкольском буроугольном бассейне было изучено Орловское месторождение. В связи с высокой зольностью угля содержание элементов-примесей в золе характеризуется низкой концентрацией. Можно выделить такие элементы как Sc, Cr, Rb, Ba, Yb, U, и только Yb превышает минимально промышленное значение.

Таким образом, согласно вышеизложенным данным, в золе углей Казахстана установлены повышенные содержания следующих элементов: Sc, Cr, Co, Sr, Ba, Zn, Yb, Hg, U. Часто встречаются аномальные концентрации Sc, Cr, Ba, Rb, Yb, эпизодически – Co, Sr, La, Hg (рис. 1).



## Рисунок 1 – Содержание элементов в золошлаковых отходах крупных угольных бассейнах Казахстана

Нами исследованы металлоносность ЗШО только некоторых месторождений углей Казахстана. Вовлечение золошлаковых отходов и золоноса после сжигания угля, как сырье для извлечения редких и редкоземельных, а также благородных металлов требует тщательного анализа современными спектральными приборами и создание банка данных. Промышленное освоение технологий выделения редкоземельных металлов оправдывается дорогой стоимостью металлов на рынке. Например, стоимость 1 г скандия на рынке составляет приблизительно 10 долл.; рубидия – 6,7 долл.; иттербия – 1,2 долл. Тогда основным показателем рентабельности будет извлечение ценных компонентов из ЗШО с высокой добавленной стоимостью.

Иногда исторические данные по содержанию редких и благородных металлов в угле не корректны, так как угольные месторождения были открыты в 30-70 годах прошлого века, и в то время не было высокочувствительных приборов для обнаружения высоких концентраций металлов.

### Литература:

1. Кажумуханова М.З. Элементы-примеси в угольных месторождениях Казахстана // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А.Усова студентов и молодых ученых, Томск: в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – С. 105-106.
2. Элементы-примеси в месторождениях Казахстана: справочник / под ред. Абдуллина А.А. и др.- Алматы ИАЦ ГПР РК, 1999 – Т. II – 144 с.
3. Введение в металлогению горючих ископаемых и углеродсодержащих пород : учеб. пособие / Волков В.Н., Полеховский Ю.С., Сергеев А.С., Тарасова И.П.; С.-Петербург. гос. ун-т. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 1997. – 248 с.
4. Брюшков В.И., Ворохова Л.А. О перераспределении химических элементов в зоне поверхностного выветривания углей / Вопросы геологии коры выветривания Казахстана. Алма-Ата: Казахск. НИИ минерал, сырья, 1972. Вып. I. – С. 165-169.

## СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН ИЗ КАМЕННОУГОЛЬНОЙ СМОЛЫ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Казанкапова М.К., Наурызбаева А.Т.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан

Углеродные нановолокна (УНВ), как один из наиболее важных представителей углеродных материалов, исследованы как в фундаментальных научных исследованиях и практических применениях [1]. УНВ представляют собой класс таких материалов, в которых изогнутые графеновые слои или наноконусы сложены в форме квази-одномерной нити, внутренняя структура может быть охарактеризована углом  $\alpha$  между слоями графена и осью волокна [2].

УНВ привлекли большое внимание учёных своими потенциальными термическими, электрическими, экранирующими и механическими свойствами [3]. Благодаря их исключительным свойствам и низкой стоимости, они в настоящее время все чаще используются в различных материалах, например таких как композиты. Композиты УНВ могут применяться в качестве перспективных материалов во многих областях, таких как электрические устройства, электродные материалы для батарей и суперконденсаторов, а также в качестве датчиков. Каменноугольный пек – остаток от перегонки каменноугольной смолы после пиролиза. Он представляет собой твердую иногда вязкую массу чёрного цвета. В составе каменноугольного пека преобладают высокомолекулярные ароматические углеводороды, высшие фенолы и органические основания. Технология получения углеродного волокна на основе пека включает несколько стадий: подготовка субстрата, синтез волокна методом электроспиннинга, стабилизация в окислительной атмосфере, карбонизация в инертной атмосфере, графитизация при повышенной температуре. Электроспиннинг это универсальный и эффективный метод получения непрерывных нановолокон от субмикронных диаметров до нанометровых диаметров, используя высокопотенциальное электрическое поле. Технология может быть легко использована в лаборатории и можно масштабировать до промышленного процесса. Электропреобразование нановолокон из полимерных растворов или расплавов представляет практический интерес, поскольку имеют много потенциальных сфер применений [4].

Для получения углеродных нановолокон нами использованы доступные материалы как каменноугольная смола из угля месторождения «Шубарколь», которая имела следующие характеристики: плотность при 20° С - 1070 кг/м<sup>3</sup>; вязкость при 80 °С - 2,9-3,3



Рисунок 4 – Электронно-микроскопические снимки карбонизированной УНВ

Таким образом в результате УНВ можно получить еще один продукт - углеродные сферы (УС), которые привлекли значительный интерес среди исследователей из-за их потенциального применения, например, в газовом разделении и в качестве молекулярных сит, кристаллов с фотонной запрещенной зоной, подложек катализаторов и материалов электродов для литий-ионных аккумуляторов. УС служат опорными подложками благодаря их высокой площади поверхности и высокой структурной стабильности, помимо других свойств. По сравнению с углем, нефтью или производными продуктами, УС полученные из устойчивого, недорогого сырья для хранения энергии, стали особенно интересными.

Предлагаемый способ получения УНВ и композита построен на основе метода электроспиннинга, который является наиболее перспективным способом промышленного производства и обеспечивает получение продукта с относительно высокой однородностью фракции, что определяет достижение прочностных характеристик, предъявляемых к конструкционным материалам. Экологический эффект исследования заключается в создании экологически чистой технологии основанной на переработке вторичного сырья (каменноугольная смола и др. отходы угледобычи) для получения углеродных волокон и композитов на их основе. Создание данной технологии позволит решить экологический аспект утилизации данного типа отходов с получением экономически рентабельного продукта.

Литература:

[1] Lichao Feng, Ning Xie, Jing Zhong (2014) Carbon Nanofibers and Their Composites: A Review of Synthesizing, Properties and Applications, *Materials*, 7:3919-3945. DOI: 10.3390/ma7053919 (in Eng.).

[2] A. V. Melechko, V. I. Merkulov, T. E. McKnight, M. A. Guillorn, K. L. Klein, D. H. Lowndes, and M. L. Simpson, J. (2005) Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly, *Journal of Applied Physics* 97, 041301. DOI: org/10.1063/1.1857591 (in Eng.).

[3] Tibbetts, G.G., Lake, M.L., Strong, K.L., Rice, B.P. (2007) A Review of the Fabrication and Properties of Vapor-Grown Carbon Nanofiber/Polymer Composites, *Composites Science and Technology*, 67(7-8):1709-1718. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.015 (in Eng.).

[4] B. T. Yermagambet, M. K. Kazankapova, A. T. Nauryzbaeva, Z. A. Mansurov, G. T. Smagulova, B. B. Kaidar (2019) News of the national academy of sciences of the republic of kazakhstan series of geology and technical sciences 4(436):86 – 94. DOI: org/10.32014/2019.2518-170X.101(in Eng.).

## ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ КАЗАХСТАНА

**Авторы:** Ермағамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М., Урлибай Р.К., Болат О.С., Семенова Я.А.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г.Нур-Султан, Казахстан

Каждый год растет огромное количество золошлаковых отходов (ЗШО), образующихся на ТЭЦ, ГРЭС, в котельных. Текущая глобальная годовая добыча ЗШО составляет приблизительно 750 миллионов тонн [1], и в ближайшем будущем, как ожидается, это количество отходов будет расти. Данный факт является одним из серьезных экологических проблем, связанным с угрозой здоровью населения и экологической безопасности окружающей среды (ущерб для почвы, растений, атмосферы). Летучая зола может даже попасть в почву и загрязнить подземные воды тяжелыми металлами [2,3]. Из золошлаковых отходов из угля, вырабатываемых ТЭЦ, в Казахстане перерабатывается около 8 % золы (менее 1,9 млн тонн). Если использование ЗШМ останется на этом уровне, то к 2020 году объём накопленных отходов превысит более 650 млн. т, а к 2030 году – 1 млрд тонн. [4].

Цель данной работы – разработка безотходной технологии переработки ЗШО с применением электрофизических методов обработки золы. Данная технология разработана в ТОО «Институт химии угля и технологии» (г.Нур-Султан), которая в корне отличается от традиционной переработки, что подтверждено охранным документом Республики Казахстан [5]. Принципиальная схема переработки золы углей по данной технологии приведена на рисунке 1, в соответствии с которой получают следующие продукты: микросфера, техуглерод, магнитная фракция (магнетит), муллит (огнеупорный наполнитель), кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), глинозем.

Согласно предлагаемой технологии, зола угля после измельчения и магнитной сепарации с извлечением в основном магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), далее смешивается с водой в соотношении 1/2 соответственно и подвергается обработке мощным высоковольтным электрическим разрядом (30 кВ), с целью ослабления и/или разрыва химических связей, например, вскрытия спекших молекул муллита и сплавов. Электроразрядная установка состоит из регулятора мощности, блока конденсаторов, повышающего трансформатора (от 220 В до 30 кВ), реактора.

Выбор электроразрядной технологии связан с тем, что здесь действующими факторами являются высокие и сверхвысокие импульсные давления, мощные импульсно возникающие кавитационные процессы, мощные электромагнитные поля (десятки тысяч

эрстед), многократная ионизация соединений и элементов и многие другие сильнодействующие процессы [6]. Данные процессы могут приводить к взаимному отслаиванию друг от друга многокомпонентных твердых тел сложного фазового состава (к каким относится зола угля). Например, при электрогидравлическом дроблении горных пород и других материалов многие химические элементы и их соединения, входящие в состав этих пород, переходят в воду в виде растворимых соединений в количествах, достигающих 90-95 % от массового содержания их в исходном материале [7]. Более того, в результате ранее проводимых исследований [6] было обнаружено, что при электрогидравлической обработке угля выделяются более 50 % содержащегося в нем германия и еще 26 элементов в виде различных их соединений.

После электроразрядной обработки водный раствор золы подается на импульсно-инерционную установку (концентратор) (рис. 2), принцип действия которой основан на разделении частиц золы угля в водном растворе золы (в соотношении 7-10) по разному удельному весу под действием давления, создаваемого насосом. На выходе с установки получают 10-12 образцов золы угля с различной плотностью.

Процесс разделения происходит под импульсно-инерционным воздействием давления (напора) пульпы на частицы твердой фазы и регулируется конструктивно предусмотренными элементами управления распределением по фракциям, при этом легкая и тяжелая зольно-шлаковые фракции распределяются по верхним и нижним секциям концентрационных колонн и отбираются через выпуски. Лёгкая зольная фракция представлена в основном техническим углеродом, алюмосиликатными микросферами, легкими металлами и легко отделяется на первых стадиях процесса. Тяжелая зольная фракция содержит муллит, глинозем, кремнийорганический материал, стекловидную фазу, магнитную фракцию, тяжелые металлы. Инерционно-кавитационная установка технически проста в исполнении и мало потребляет электрической энергии (только от насоса).

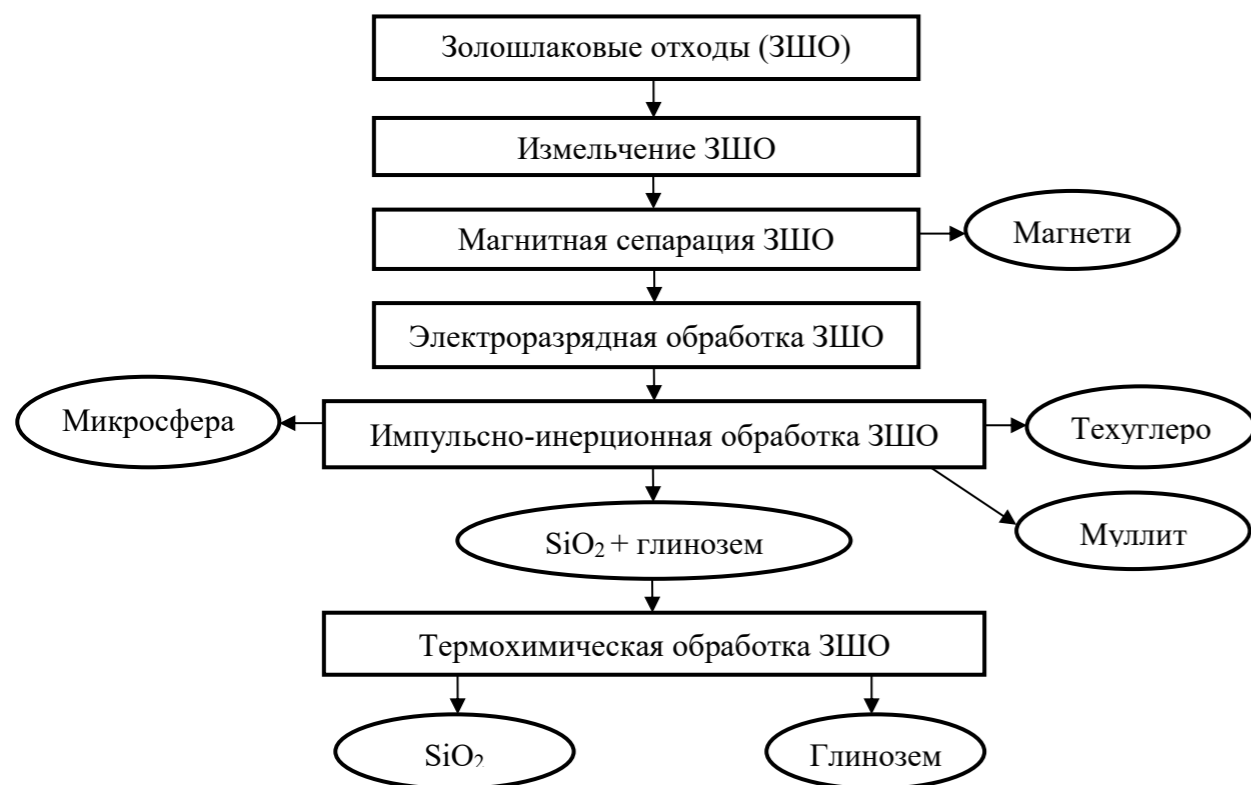


Рисунок 1 – Принципиальная схема переработки золы углей

Данная технология переработки ЗШО прошла испытания в опытном цехе в ТОО «Институт химии угля и технологии» на лабораторной импульсно-инерционной установке и на территории котельной в поселке «Акмол» (Акмолинская область) на полупромышленной импульсно-инерционной установке производительностью 2 тонн/час по сухому сырью (рис. 2). В качестве исходного сырья использовали золу Майкубенского угля и золу-уноса Экибастузского угля (ГРЭС-2), элементный состав которых представлен в таблице 1. На рисунке 3 приведены продукты (из исследуемых образцов золы углей) на данных установках (техуглерод и микросфера).

Таблица 1 – Элементный состав золы Майкубенского и Экибастузского углей

Наименование образца	Содержание, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O
Зола Майкубенского угля	50,16	26,63	8,27	5,84	2,79	1,05	0,87	1,16
Зола-уноса Экибастузского угля (ГРЭС-2)	61,04	23,78	5,82	2,78	0,79	1,01	0,37	0,95



а)



б)

Рисунок 2 – Лабораторная (а) и полупромышленная (б) установки



Техуглерод



Микросфера



Кремнезем (SiO<sub>2</sub>),

Рисунок 3 – Техуглерод, микросфера и кремнезем, полученные на установке

Предварительный технико-экономический расчет показал эффективность и высокую рентабельность технологии с извлечением ценных компонентов золошлаковых

отходов после сжигания Экибастузского угля. Так, при переработке 13,8 тонн/час золы себестоимость 1 тонны полученных продуктов (в тенге) составляет (в скобках указана примерная рыночная стоимость): микросфера – 469,0 тыс. (≈ 800 тыс.); кремнезем – 938,1 тыс. (1600 тыс.); магнетит – 58,6 тыс. (≈ 100 тыс.); муллит – 762,2 тыс. (≈ 1300 тыс.). Вложенные средства на приобретение основных средств в виде оборудования окупятся в первые месяцы работы данного производства. При этом ежегодная рентабельность в среднем за 10 лет составит в пределах 52 %.

Таким образом, предлагаемая технология переработки угольной золы имеет следующие основные достоинства: использование невысоких температур - до 100 °С; применение электрофизического воздействия на сырье позволяет провести качественную подготовку золы угля для ее дальнейшей переработки в ценные продукты при более мягких технологических режимах.

#### Литература:

1. Лаврик Н.А. Сопутствующие редкие и благородные металлы ископаемых углей юга Дальнего Востока // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. С. 98-106.
2. Berry E.E., Enhanced resource recovery by beneficiation and direct acid leaching of fly ash / E.E. Berry, R.T. Hemmings, D.M. Golden // Fly Ash and Coal Convers. by. Prod.: Charact., Util. and Disposal: III Symp. Pittsburgh, 1987.P. 365– 380.
3. Концевой А.А., А.Д. Михнев, Г.Л. Пашков, Л.П. Колмакова. Извлечение скандия и иттрия из золошлаковых отходов // Журнал прикладной химии, 1995 – Т. 68. – № 7.
4. Борбат В.Ф., Михайлов Ю.Л., Адеева Л.Н., Голованова О.А. Гидрощелочное извлечение галлия из золы уноса экибастузских углей // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2000. – Т. 43. – № 1. – С. 102–105.
5. Патент РК № № 34099 на изобретение. Способ переработки золошлаковых отходов электрическим разрядом. Ермагамбет Б.Т. и др. Оpubл. 08.01.2020.
6. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
7. Гаврилов Г.Н., Егоров А.Л., Коровин С.К. Электроимпульсная технология в горном деле и строительстве. М.: Недра, 1991. 127 с.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ УГЛЯ В ПРОДУКТЫ С ВЫСОКОЙ ДОБАВЛЕННОЙ СТОИМОСТИ

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Касенова Ж.М., Нурғалиев Н.У., Казанкапова М.К.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан

Уголь был и остается основным энергоносителем в Казахстане. Уголь как макромолекулярное металлоорганическое соединение является новым источником энергии и новых материалов для изготовления топливных батареи и конденсаторов, ветряных мельниц, солнечных панелей, сорбентов, нанокompозитных материалов и много других высокопрочных космических волокон для аппаратов.

В настоящий период актуальной задачей для угледобывающих предприятий, становится разработка такой стратегии развития, которая позволила бы значительно повысить рентабельность производства не только добычи, но и глубокой переработки угля. Один из путей реализации такой стратегии – это трансформация добываемого сырья в товарную продукцию с высокой добавленной стоимости.

По назначению продуктов из угля его можно переработать по двум направлениям. Первое направление - это топливного назначения. Производство бензина и дизельного топлива для стран производящих нефть считается не совсем рентабельным. Производство данного направления идет с применением термических процессов. Второе направление – это продукты из угля нетопливного назначения, которое производится без термического нагрева с применением наиболее экологичных и экономически доступных технологий.

Как показала практика, производство из угля продуктов топливного назначения требует больших капитальных затрат и достаточно сложно в технологическом оформлении.

Экономические расчеты показали, что целесообразность производства продуктов нетопливного назначения, пользующих спросом, например органическое безнитратное удобрение из бурых углей Казахстана. Весь агропромышленный комплекс пользуется минеральными удобрениями: аммиачной селитрой, аммофосом, нитрат калием и др. Получаемые таким образом продукты в своем составе содержат нитраты, продукты разложения пестицидов, фунгицидов, что ограничивает экспорт таких продуктов за рубеж. Из одной тонны бурого угля, как показало эксперименты, при электрофизическом воздействии можно получить до 3 тонн концентрата гумата калия с содержанием

активных веществ 56 %. Стоимость 1 тонны такого концентрата на рынке Западной Европы составляет до 35 тыс. долл.

Создание такого высокорентабельного производства при угледобывающих компаний дало бы возможность развивать другие доступные технологий с производством угольных наукоемких продуктов. Например, рынок сбыта некоторых продуктов, получаемых из угля, очень огромен. Например, углеродные нанокompозитные материалы 20 млрд. углеродное волокно 2,5 млрд., сорбентов., гуматное удобрение – на 5 млрд. 25 млрд.долл.США.

Нанокompозиты на основе углеродных нановолокон и нанотрубок и создание на их основе новых типов натрий – ионных батареи, аккумуляторов и конденсаторов, топливных элементов для хранения энергии является более чем перспективное направление углехимии.

Вовлечение золошлаковых отходов как сырье для извлечения редких, редкоземельных металлов является актуальной задачей для разработчиков. В угольной золе имеются не только германий, скандий, но и благородные металлы: золото, платина, палладий в доступной минеральной форме и хорошими показателями кларка. В золе угля Каражыра содержатся, г/т: лития 33,75, ванадия 418,52, галлия 86,98. В золе Экибастузского угля содержатся редкие металлы, такие как Ga, Ce, V, Zr, Sc, Hf . При оценке экономической целесообразности извлечения металлов из углей и зол углей необходимо учитывать экологичность извлечения и стоимость металла на мировом рынке, а также отсутствие других источников сырья. Как показали расчеты, себестоимость извлечения редких металлов из зол гораздо ниже, чем традиционным путем. Например, на мировом рынке стоимость галлия \$1200 кг, себестоимость извлечения \$120, при переработке концентрата золы из 2000 тонн можно извлечь по 10 тонн титана и циркония, 1 тонну ванадия, и 100 кг галлия. Затраты по проекту составит \$1,2 млн. Срок окупаемость 24 месяца.

Переработка золошлаковых отходов на промышленном производстве может дать от одного до нескольких десятков тонн редких металлов в год. Следовательно, попутные полезные компоненты углей Казахстана можно считать перспективной местной минерально-сырьевой базой ряда ценных металлов, например, галлия, ванадия, вольфрама, обеспечивающих часть потребности.

В Экибастузе ежегодно накапливается до 15 млн. тонн золошлаковых отходов, включая металлургические и другие предприятия, в том числе из 2,6 млн. тонн ежегодного выхода золы и шлака на теплоэлектростанциях области 2,4 млн. тонн в виде золошлаковых смесей способом гидроудаления отправляется в отвалы.

Нами разработана технология производство микросфер, магнетита, оксидов кремния и алюминия и технического углерода из ЗШО. Нами посчитано, что при переработке 1 тонны ЗШО, стоимостью 1000 тенге производим продуктов на 1 311 тыс. тенге.

Реализация наиболее доступных технологий в угольную промышленность необходимо осуществлять с помощью организации совместных малых и средних предприятий в научно – технической сфере. Это позволит быстро проводить НИОКР, аналитические работы современными высокоточными приборами, которые располагают лаборатории коллективного пользования в ведущих университетах, а также в научных организациях и горнодобывающих компаниях.

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПЫТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДЗЕМНОГО НАГРЕВА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

**Авторы:** Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Касенова Ж.М., Бухаркин А.А., Нургалиев Н.У.

**Организация:** ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Нур-Султан, Казахстан.  
Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,  
Россия

В последнее время существенно растет внимание к технологиям эффективной переработки твердых ископаемых топлив – каменных и бурых углей, горючих сланцев. На роль одной из наиболее эффективных технологий переработки может претендовать подземная конверсия. Она не требует извлечения породы на поверхность, а также последующей утилизации шлака.

Применение электроразрядных технологий может дать новый виток развития методов подземной конверсии. Нами ранее обнаружено, что электроразрядные процессы, такие как частичные разряды и вызываемый ими электрический триинг могут приводить к пробоям некоторых видов твердых топлив при относительно невысоких напряжениях. Этот эффект может быть использован для электрического пробоя и последующего нагрева участка подземного пласта путем использования канала пробоя в качестве резистивного нагревательного элемента [1].

Для того, чтобы изучить применимость углей Казахстана для конверсии таким способом, нами были исследованы характеристики частичных разрядов и пробоя в углях, взятых с угольных разрезов Богатырь, Сарыадыр и Майкубе. Частичные разряды (ЧР) возникают в диэлектриках под действием приложенного внешнего высокого напряжения. ЧР представляет собой неполный пробой диэлектрика, приводящий к замыканию разрядным каналом части межэлектродного расстояния. Причиной возникновения частичных разрядов является неравномерное распределение электрического поля внутри материала. Для неоднородного вещества, имеющего включения из разных материалов, напряженность в межэлектродном пространстве будет распределяться обратно пропорционально диэлектрической проницаемости материалов [2]:

$$\frac{E_d}{E_B} = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_d},$$

где  $E_d$ ,  $E_B$  – напряженность в основной части диэлектрика и включении соответственно,  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon_B$  – диэлектрическая проницаемость основной части диэлектрика и включения соответственно. Таким образом, наибольшая напряженность поля будет на элементах, имеющих наименьшую диэлектрическую проницаемость. Как правило, таковыми

являются газовые включения и поры. Причем, напряженность на них будет тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость остальной части диэлектрика.

В зависимости от материала диэлектрика и его молекулярной структуры дендриты могут быть проводящими и непроводящими [3,4]. В случае непроводящих дендритов триинг происходит вследствие повышенной напряженности внутри самого дендрита. Основная часть ЧР сосредоточена в области основания дендрита. ЧР имеют сравнительно большой кажущийся заряд, который возрастает при удлинении дендрита. Удлинение структуры в этом случае происходит тогда, когда стримеры разряда достигают острия дендрита. При этом образуется полая канальная структура с диэлектрическими стенками. В этом случае интенсивность частичных разрядов ослабевает по мере роста и ветвления структуры. Канальная структура в этом случае покрыта низкоомным слоем продуктов термодеструкции диэлектрика [3].

На основании проведенных ранее исследований экспериментов по пробоям твердых топлив, нами сделаны следующие наблюдения особенностей электрической деградации этого материала. При неизменной величине приложенного напряжения рост дендритов происходит некоторое время, после которого интенсивность частичных разрядов снижается. При повышении напряжения интенсивность ЧР вновь повышается и продолжается некоторое время, после чего снова снижается. Такое поведение связано с тем, что изменение напряжения на электродах будет влиять на величину поля, сконцентрированного на острие дендрита. В фундаментальной работе [5] представлена формула, описывающая максимальная напряженность поля на острие электрода в электродной системе острие-плоскость:

$$E = \frac{2V}{r \ln\left(1 + \frac{4d}{r}\right)} \quad (1)$$

Благодаря этому механизму напряжение триингового пробоя существенно ниже, чем напряжение мгновенного электрического пробоя на постоянном или импульсном напряжении. Можно предположить, что максимальная напряженность на головке дендрита велика и при росте дендрита поддерживается на том постоянном уровне, который достаточен для пробоя окружающих участков и дальнейшего удлинения дендрита.

Внутрипластовая конверсия твердых топлив предполагает нагрев породы непосредственно в условиях залегания. Для лабораторных исследований производилась имитация условий подземного пласта для образца твердого топлива. Имитировались такие критерии подобия, как пластовое давление и напряженность электрического поля. Структурная схема установки показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема установки

Методика экспериментов заключалась в следующем. Образец с установленными электродами и термопарами помещался в камеру. Электроды и термопары соединяются проводниками с электрическими вводами камеры, которые изолированы от корпуса камеры керамическими изоляционными трубками. Вводы герметизированы с помощью грибового уплотнения и обеспечивают герметичность камеры. После герметизации и вакуумирования, камера заполнялась азотом до рабочего давления, которое в эксперименте составляло  $2 \text{ кгс/см}^2$  и поддерживалось постоянным. Снаружи к электрическим вводам камеры подключались выводы электрооборудования установки. Путем подачи высокого напряжения сначала производился пробой образца. Далее установка переключается с высоковольтного на силовоточный режим работы, и производится нагрев образца пропусканием тока через канал пробоя. По мере нагрева выделяющийся газ смешивается с азотом. Для поддержания постоянного давления в камере выделение газа компенсируется сбросом избыточного давления через газовый ввод камеры. Таким образом, выделяющийся пиролизный газ постепенно замещает азот. В конце эксперимента производился отбор пробы газа из камеры для анализа. Отбор проб производился через прямой шланг, соединяющий камеру и хроматограф. Мощность нагрева в течение всего времени нагрева составляла  $\sim 600 \text{ Вт}$ . На рисунке 2 приведены зависимости температуры в измеряемых точках в зависимости от времени нагрева для образца угля Богатырь. Термограммы остальных образцов идентичны.

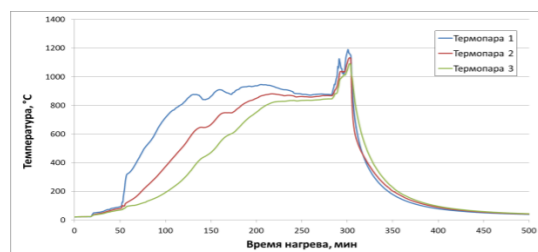


Рисунок 2 – Зависимости температуры от времени нагрева

Результаты анализа и калорийность полученного газа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные данные по физическому моделированию подземного нагрева углей

Параметры	Образец			
	Богатырь	Майкубе	Сарыадыр	Сарыадыр

			(надежный)	(пятиметровый)
Исходная масса образца, кг	5,590	5,067	4,199	4,316
Масса после нагрева, кг	5,022	4,155	3,993	3,842
Потеря массы, г	568	912	206	474
Объем газа, м <sup>3</sup>	0,764	1,066	0,175	0,432
Средняя молярная масса газа, г/моль	7,65	10,85	9,34	9,09
Удельная теплотворная способность газа, МДж/м <sup>3</sup>	13,89	11,93	14,18	19,16
Удельная теплотворная способность газа, ккал/м <sup>3</sup>	3320	2851	3389	4577
Расчетная масса газа, г	261	516	73	175
Расчетная масса жидких продуктов, г	307	396	133	299
Электроэнергия, затраченная на нагрев, кВт·ч	4,54	1,94	0,78	3,39

#### Выводы.

Впервые проведены экспериментальные работы по физическому моделированию подземного нагрева для исследуемых углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубе, Богатырь по конверсии угля в газообразные продукты: электротепловой триинг → электротепловой пробой → нагрев электрическим током → пиролиз → газ. В результате из исследуемых углей был получен синтез газ с высоким содержанием горючих компонентов:  $\text{H}_2$  – 64-75%,  $\text{CO}$  – 9,9-21,35%,  $\text{CH}_4$  – 4,81-10,8% и высокой теплотворной способностью – 12-16 МДж/м<sup>3</sup>.

#### Литература:

- 1 Bukharkin A.A., Lopatin V.V., Martemyanov S.M., Koryashov I.A. Electrical discharge phenomena application for solid fossil fuels in-situ conversion // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. - Vol. 552. – [012012, 4 p.].
- 2 Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. 1979. – 224 с.
- 3 J V Champion and S J Dodd Simulation of partial discharges in conducting and non-conducting electrical tree structures // J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) 1235–1242.

- 4 Dodd S.J., Chalashkanov N.M., Fothergill J.C. Partial Discharge Patterns in Conducting and Non-Conducting Electrical Trees // 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
- 5 Mason J. H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields //Proceedings of the IEE-Part C: Monographs. – 1955. – Т. 102. – №. 2. – С. 254-263.

## ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ АЛМАТИНСКИХ ТЭЦ

**Автор:** Садуакасова Г.Б.

**Организация:** Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан

В рамках программы «Энергия будущего» (Power the future) [1,2] при финансировании USAID были обследованы три теплоэлектроцентрали города Алматы. Результаты этой работы представлены в отчете «Оценка вариантов повышения энергоэффективности ТЭС-1, ТЭС-2 и ТЭС-3 в Алматы, Казахстан» [3], который включает 26 энергосберегающих мер по повышению энергоэффективности.

Анализ возможностей повышения энергоэффективности на ТЭЦ-1 показал целесообразность рассмотрения следующих восьми технических мероприятий, которые представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Экономия энергии, топлива (в натуральном выражении) и срок окупаемости на ТЭЦ-1

Наименование мероприятий по энергосбережению	Прямая экономия			Экономия топлива за счет экономии тепла, тыс. м3/год	Всего экономия топлива, тыс. м3/год	Срок окупаемости, лет
	Электроэнергии, кВтч/год	Тепла, Гкал/год	Топлива тыс. м3/год			
Установка дополнительных экономайзеров-утилизаторов за котлами БКЗ-160 КА № 12 и КА № 13	-88 000	16 608		2 487	2 487	1,20
Реконструкция багерных насосов и золосистемы котлов	1 938 000					0,75
Частотное регулирование дутьевых вентиляторов котлов КА № 12 и КА № 13, работающих в переменных режимах	735 600					14,22
Частотное регулирование дымососов котлов КА № 12 и КА № 13, работающих в переменных режимах	2 220 000					9,58
Полная автоматизация регулирования технологических параметров			1 755		1 755	4,46

энергетических котлов БКЗ 160-100Ф КА № 12 и КА № 13						
Возможность снижения инфильтрации воздуха в котельном цехе		354		43	43	9,19
Возможность снижения инфильтрации воздуха в турбинном цехе		244		30	30	9,97
Восстановление насосов гидрофобными покрытиями	40 110					1,79

Все предложенные мероприятия ведут к повышению энергоэффективности работы ТЭЦ-1. Следующие мероприятия представляются наиболее привлекательными с точки зрения сроков окупаемости инвестиций:

- Реконструкция багерных насосов и золосистемы котлов;
- Установка дополнительных экономайзеров-утилизаторов (ЭУ) за котлами БКЗ 160-100Ф КА № 12 и КА № 13;
- Восстановление насосов гидрофобными покрытиями.

Нужно заметить, что по предложению ТЭЦ-1 восстановление гидрофобными покрытиями рассмотрено для насосов осветленной воды, тогда как на станции имеется значительный парк другого насосного оборудования (сетевые насосы, подпиточные насосы и т. д.), и при последовательном внедрении мероприятия на всех насосах можно будет экономить до 400 - 500 тыс. кВтч электроэнергии в год.

Кроме того, благодаря короткому периоду окупаемости мероприятия по установке дополнительного экономайзера-утилизатора его целесообразно сделать практически на всех котлах, работающих более 2 000 часов в год.

Анализ возможностей повышения энергоэффективности на ТЭЦ-2 показал целесообразность рассмотрения следующих шести технических мероприятий, которые представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Экономия энергии, топлива (в натуральном выражении) и срок окупаемости на ТЭЦ-2

Наименование мероприятий по энергосбережению	Прямая экономия			Всего экономия топлива, тыс. м3/год	Увеличение выработки электроэнергии, кВтч/год	Срок окупаемости, лет
	Электроэнергии, кВтч/год	Тепла, Гкал/год	Топлива тыс. м3/год			
Полная автоматизация регулирования	1 148 619		6 426	6 426		3,76

основных технологических параметров и пылеприготавливающей системы энергетического котла БКЗ 420-140-7С КА № 7						
Частотное регулирование дутьевых вентиляторов котла КА № 8, работающих в переменных режимах	2 000 000					7,86
Частотное регулирование дымососов котла КА № 8, работающих в переменных режимах	5 000 000					6,23
Реконструкция паровых турбин ПТ-80-130/13			8 659	8 659	65 000 000	7,15
Улучшение работы системы подготовки воды системы технического водоснабжения с целью предотвращения отложения солей на поверхностях нагрева и в градирнях			44 721	44 721		1,50
Восстановление насосов гидрофобными покрытиями	352 996					2,03

В соответствии с предложениями АО «АлЭС» для ТЭЦ-2 оценочные расчеты по автоматизации были сделаны только для котла КА № 7, на ТЭЦ-2 имеется еще шесть котлов, где это мероприятие могло бы быть внедрено и принесло бы дополнительную экономию электроэнергии и топлива.

Анализ возможностей повышения энергоэффективности на ТЭЦ-3 показал целесообразность рассмотрения следующих одиннадцати технических мероприятий:

- Установка дополнительного воздухоподогревателя за парогенератором БКЗ 160-100Ф;
- Замена турбин с возможностью увеличения мощности с 50 до 57 МВт с улучшенными технико-экономическими показателями;
- Замена градирни № 5 на энергоэффективную;
- Полная автоматизация регулирования основных технологических параметров энергетических котлов БКЗ 160-100Ф и мельничной системы;

- Замена уплотнений паровых турбин при проведении капитальных ремонтов на усовершенствованные конструкции уплотнений с сотовой поверхностью;
- Частотное регулирование дутьевых вентиляторов котлов, работающих в переменных режимах;
- Частотное регулирование дымососов котлов, работающих в переменных режимах;
- Частотное регулирование для сетевых насосов 7А и 7Б;
- Новые подпиточные насосы тепловой сети с частотным регулированием;
- Установка электрофильтра с экономайзером для парогенератора БКЗ 160-100Ф;
- Восстановление насосов гидрофобными покрытиями.

Представители ТЭЦ-3 выделили первые три мероприятия в качестве приоритетных.

Суммарно, энергосберегающие мероприятия, предлагаемые на этом этапе работы, могут обеспечить снижение годового потребления:

- электрической энергии в объеме 8 289 тыс. кВтч;
- тепловой энергии в размере 19 079 Гкал;
- угля в размере 164 640 т.

Для повышения энергоэффективности Казахстанских ТЭЦ необходимо провести аналогичные обследования, для оценки потенциала энергосбережения и возможности планирования модернизации и реконструкции оборудования.

Литература:

[1] <http://ptfcar.org/en/power-the-future-2/>

[2] <https://www.samruk-energy.kz/ru/press/i4651>

[3] Assessment of the energy efficiency opportunities at CHP-1, CHP-2 AND CHP-3 in Almaty, Kazakhstan, “Power the Future” Regional Program, Contract No. Aid-176-I-17-00001, Task order AID-176-TO-17-00002, 2019.

## РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКЕ КОТЛОВ

**Автор:** Макзумова А.К., Тютеебаева Г.М.

**Организация:** Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан

В 2010 году Российской Федерацией, Республиками Беларусь и Казахстан был заключен договор о поэтапном переходе на производство более качественных бензинов. Этот договор послужил еще одним шагом на пути к защите окружающей среды. В этой связи уменьшится производство мазута, и казахстанские нефтеперерабатывающие заводы будут заинтересованы в производстве высокооктановых бензинов, остро встанет вопрос о безмазутной растопке угольных котлов.

На Международной выставке ЭКСПО-2017, проходившей в г.Нур-Султан, Казахстан, Казахским национальным университетом имени аль-Фараби был представлен проект технологии безмазутной растопки котлоагрегатов ТЭС г.Алматы из любого теплового состояния с высокими значениями технико-экономических и экологических показателей.

На данный момент Республика Казахстан входит в топ десять стран мира, являющихся крупнейшими производителями угля на мировом рынке. На долю Республики приходится около 3% от общемирового экспорта угля, а геологические запасы углей оцениваются в 150 млрд. тонн [1].

Уголь – основное энергетическое топливо для большинства тепло- и электростанций не только Казахстана, но и мира. Стоит обратить внимание, что потребность в энергетическом угле с каждым годом имеет тенденцию возрастать, в среднем на 6%. Бурное развитие топливно-энергетического комплекса влечет за собой потребность в увеличении электрической и тепловой мощностей на ТЭС и соответственно ростом потребления угля в промышленных масштабах.

Мазут на теплоэлектростанциях используют в качестве вспомогательного топлива в целях растопки котлоагрегатов из разных тепловых состояний и подсветки факела в топке. Ежегодно от 25 до 27 тыс. тонн мазута расходуется в этих целях. На сегодняшний день стоимость мазута продолжает неуклонно расти. Кроме того, существует ряд негативных факторов использования совместного сжигания угля с мазутом. Это: возрастание механического недожога топлива, что впоследствии ведет к снижению коэффициента полезного действия-брутто котлов, повышение выбросов в атмосферу таких соединений как оксиды серы, азота, пятиоксида ванадия, а также ускорение высокотемпературной

коррозии поверхностей нагрева котлов и сокращение срока эксплуатации стационарного оборудования ТЭС [2].

Вопрос о вытеснении мазута и природного газа из топливно-энергетического хозяйства ТЭС стал как никогда актуален. Была предложена принципиально новая плазменно-энергетическая технология (ПЭТ) использования топлива. По этой технологии сжигание происходит на ионно-электронном (или физико-химическом) уровне. Отказавшись от традиционного метода, основанном на атомно-молекулярном уровне, применение ПЭТ может улучшить контроль процесса горения топлива и добиться максимально высоких показателей энергоэффективности, исключается необходимость в использовании вспомогательного топлива, в связи с тем, что двухкомпонентное топливо воспламеняется и горит устойчиво.

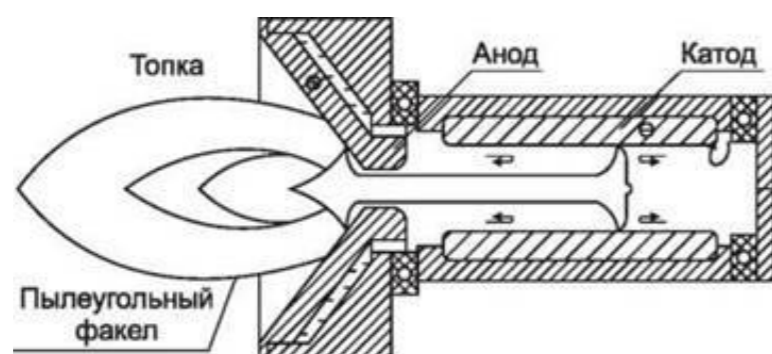


Рисунок 1 - Электродуговой плазмотрон постоянного тока с медными водоохлаждаемыми электродами, установленный в пылеугольной горелке котла без реконструкции самого котла.

На рисунке 1 показан наиболее эффективный - муфельный вариант системы плазменного воспламенения углей (СПВ). Принцип работы данной горелки заключается в следующем. Поток аэросмеси делится на две части. Часть аэросмеси, поступающая во внутреннюю трубу, подвергается воздействию плазменной струи, направленной перпендикулярно оси горелки. При этом аэросмесь нагревается до температуры выделения летучих веществ и частичной газификации коксового остатка. Получившееся высокорекреакционное двухкомпонентное топливо направляется в топочное пространство, где, смешиваясь с остальной аэросмесью и вторичным воздухом, стабилизирует процесс горения. Другая часть аэросмеси, поступая в промежуток между трубами, охлаждает их, выступая своего рода тепловой изоляцией.

Полные испытания технологии плазменной подсветки и стабилизации горения факела проводились на Гусиноозёрской ГРЭС (котел БКЗ-640) и Улан-Баторской ТЭЦ-4 (котел БКЗ-420-140). При разработке и внедрении плазменных способов термохимической

подготовки топлива на Улан-Удэнской ТЭЦ-2 были проведены испытания на котле ТПЕ-185 паропроизводительностью 160 т пара в час, с шестью плоскофакельными горелками [3].

В Казахстане безмазутная технология растопки котлоагрегатов была успешно проверена в 1987 и 1996 годах на ТЭЦ №2 в Усть-Каменогорске и ТЭЦ №3 в Алматы соответственно.

Ниже приведена сравнительная таблица, данные которой были рассчитаны в моей дипломной работе «Модернизация ТЭЦ-2 г.Астана на безмазутную растопку котла БКЗ-420-140».

Существующая технология (с мазутным хозяйством)	Плазменная технология (с ПТС)
<b>1.Расход мазута на ТЭС Казахстана</b>	
~1 млн.т/год (стоимость около 319 млн. долл. США)	0
<b>2.Капиталовложения на ТЭС</b>	
Мазутное хозяйство: 100%	Плазменно-топливные системы: 3-5%
<b>3.Эксплуатационные затраты</b>	
100%	28-30%
<b>4.Расход электроэнергии на собственные нужды ТЭС</b>	
На мазутное хозяйство: 3-5%	На ПТС: 0,5-1,0 %
<b>Значения КПД-брутто</b>	
91,77%	93,88%
<b>Полный расход топлива</b>	
20,66 кг/с	20,459 кг/с
<b>Температура уходящих газов</b>	
145°С	130°С
<b>Потери, %</b>	
q <sub>2</sub> =6,31	q <sub>2</sub> =5,51
q <sub>3</sub> =0	q <sub>3</sub> =0
q <sub>4</sub> =1,5	q <sub>4</sub> =0,2
q <sub>5</sub> =0,343	q <sub>5</sub> =0,343
q <sub>6</sub> =0,072	q <sub>6</sub> =0,072

Преимущества плазменных технологий безмазутной растопки котлов и подсветки факела, в основе которых лежит термохимическая подготовка топлива к сжиганию, перед традиционными следующие:

- сокращение потребления мазута и газа на ТЭС;
- повышение энергетической эффективности плазменно-энергетических технологий (ПЭТ) в 3-4 раза, т.к. относительная электрическая мощность плазмотронов

составляет (в зависимости от типа углей и горелки) всего 0,5-2,0% тепловой мощности пылеугольной горелки;

- замещение углем подсветочного топлива (мазута или природного газа), что снижает выбросы оксидов азота на 40-50% благодаря превращению азота топлива в молекулярный азот в обедненных кислородом зонах воспламенения и горения, уменьшает выбросы оксидов серы на 30-40% (в случае замещения высокосернистого мазута) и почти полностью устраняет выбросы пятиоксида ванадия;
- снижение общего количества выбросов двуоксида углерода вследствие увеличения эффективности процесса горения, уменьшения механического недожога топлива и содержания углерода в уносах (в 1,5-2,0 раза);
- обеспечение растопки энергоблоков пылеугольных ТЭС при потере собственных паровых нужд станции;
- появление возможности комплексного решения вопросов техперевооружения пылеугольных энергоблоков с сохранением технических и эколого-экономических показателей ТЭС;
- сохранение технико-экономических и экологических показателей энергоблоков при использовании широкой гаммы непроектных энергетических углей.

Таким образом, из вышеприведенного материала следует, что в решении проблемы снижения потребления мазута на пылеугольных ТЭС наиболее эффективной является технология, основанная на плазменной термохимической подготовке углей к сжиганию.

#### Литература:

1. Ермагамбет Б. Т., Касенов Б. К. Чистые угольные технологии: теория и практика // Караганда: «TENGR Ltd», 2013 г. – 276 с.
2. Мергалимова А. К., Алияров Б.К., Парамонов А.М. Исследование и разработка технологии замены резервного мазута на газообразное топливо // Алматы: Диссертация, 2018 г. – 6 с.
3. Карпенко Е.И. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле. - Новосибирск: Наука; Сиб. предприятие РАН, 1998 г. - 385 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЯ ДЛЯ БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКИ КОТЛОВ

**Авторы:** Мергалимова А.К., Булбул Онгар

**Организации:** Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан; Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан

#### Аннотация

В статье рассматриваются теоретические и практические основы исследования возможности замены растопочного мазута на газообразное топливо, выделяемое при специальной термической обработке угля, а также внедрения данного способа растопки котловых агрегатов на угольных тепловых электрических станциях. Приведены результаты экспериментального исследования трех видов углей, с целью получения необходимого газообразного топлива

Ключевые слова: тепловые электрические станции, уголь, котельный агрегат, растопочное топливо, мазут, газ, летучие горючие вещества.

#### Введение

Угольная промышленность – одна из ведущих отраслей ТЭК многих стран. Уголь используют как технологическое сырье (в виде кокса) в черной металлургии и химической промышленности (коксовые газы) для производства минеральных удобрений и пластмасс, а также уголь является энергетическим сырьем для производства электроэнергии на ТЭС и для отопления жилищ. С использованием угля производится примерно 44% всей мировой электроэнергии. В Казахстане этот показатель равен примерно 72%.

Как известно, уголь значительно уступает природному газу и нефти по затратам на собственные нужды и особенно, по экологическим показателям. Однако, по оценкам Международного энергетического агентства, при существующих темпах потребления разведанные запасы нефти будут исчерпаны уже через 30 лет, а газа - в ближайшие 50 (однако Казахстан имеет более благоприятную перспективу), в то время как запасов угля, при самом интенсивном использовании, хватает на 200 лет. Необходимость развития угольных технологий сегодня уже ни у кого не вызывает сомнений. Остальных топливных ресурсов хватит на значительно меньший срок, и при этом их стоимость гораздо выше.

Угольная промышленность Казахстана является одной из наиболее крупных отраслей экономики страны. По запасам углей Казахстан уступает лишь Китаю, США, России, Австралии, ЮАР и Украине. Государственным балансом Казахстана учтены

запасы по 49 месторождениям, составляющие 33,6 млрд. тонн, в том числе каменные угли – 21,5 млрд. тонн, бурые угли – 12,1 млрд. тонн. Большая часть месторождений угля сосредоточена в Центральном (Карагандинский и Экибастузский угольные бассейны, а также месторождение Шубарколь) и Северном Казахстане (Тургайский угольный бассейн), в Южном Казахстане – Ленгерские и Нижне-Илийские угли.

На данный момент все тепловые электрические станции (ТЭС) и крупные котельные, использующие в качестве основного топлива природный газ и/или уголь, предусматривают резервное, аварийное и растопочное топливо. Как правило, этим топливом является мазут. Мазут, как топливо, обладает рядом несомненных качеств: высокая теплотворность -9500 ккал/кг, малое содержание золы -0,3-0,5%, возможность получения светящегося пламени, (обеспечивающий высокий радиационный теплообмен в топочном пространстве), возможность организации (при определенных условиях) сжигания в малых (по габаритам) топках. Однако, мазут, как топливо, имеет и ряд серьезных недостатков. При совместном сжигании угля с мазутом ухудшаются эколого-экономические показатели котлов: повышается механический недожог топлива и снижается КПД брутто (из – за возрастания затрат на собственные нужды), возрастает удельный расход условного топлива на отпускаемую электрическую энергию, возрастает высокотемпературная коррозия конвективных поверхностей нагрева, увеличивается выход оксидов азота и серы (в случае более высокого содержания серы в мазуте), появляются выбросы канцерогенной пятиоксида ванадия. Наиболее существенный недостаток мазута, как резервного и растопочного топлива, заключается в неудобствах, связанных с его эксплуатацией, вызванных многоступенчатостью в подготовке мазута к использованию. Загрузка в цистерны и последующая выгрузка из цистерн требует его разогрева до состояния с приемлемой текучестью, что, как правило, достигается за счет использования водяного пара. Это означает, что на пунктах загрузки и выгрузки мазута необходимо иметь источник пара с требуемой температурой. Помимо подогрева и перемешивания в резервуарах, также необходимо поддерживать циркуляцию мазута по всему тракту его движения, от хранилища до форсунки, для обеспечения, при необходимости, возможности подачи мазута в топку. Следовательно, подготовка мазута к сжиганию - сложный и трудоемкий процесс, при котором необходимо обеспечить: невысокое (до 3%) содержание воды в мазуте, глубокое перемешивание воды с мазутом, необходимые температуры подогрева мазута. Еще одним важным аспектом является цена, мазут - дорогостоящее энергетическое топливо.

Все вышеперечисленные факторы делают весьма актуальной задачей современной теплоэнергетики - разработку новых технологий безмазутной растопки котлов на угольных ТЭС.

На рис.1 представлена возможная технологическая схема безмазутной растопки котла и стабилизации воспламенения и горения угольного факела. Данная технология основана на использовании газообразного топлива, получаемого при термической переработке угля.

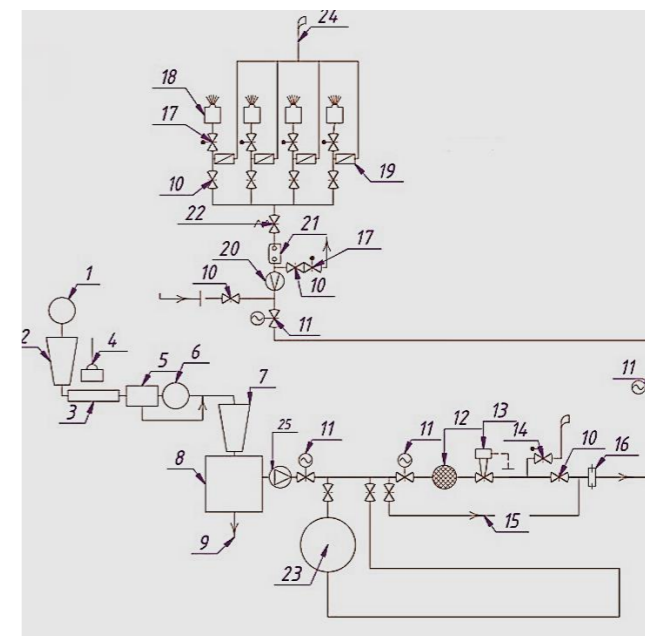


Рис. 1 Схема технологии растопки котлоагрегата с использованием горючих летучих веществ

1 Вагоноопрокидыватель, 2 приемный бункер, 3 ленточный транспортер, 4 электромагнитный сепаратор, 5 вибрационный грохот, 6 молотковая дробилка, 7 бункер сырого угля, 8 топочное устройство для нагрева угля, 9 выход обогащенной угольной массы, 10 газовая запорная задвижка, 11 задвижка с электроприводом, 12 механический фильтр, 13 регулятор давления газа, 14 предохранительный клапан, 15 байпасная линия, 16, 20 измеритель расхода, 17 регулирующая газовая задвижка, 18 газовая горелка, 19 пробковый кран, 21 быстродействующий газовый клапан, 22 заслонка регулятора расхода, 23 газовое хранилище-рессивер, 24 свеча безопасности, 25 вентилятор.

Выделение горючих летучих осуществляется в специальном топочном устройстве (8), в котором без доступа кислорода производится прогревание слоя угля. В качестве носителя начальной тепловой энергии, необходимой для подогрева угля могут применяться: пар, при наличии работающего котла; электричество или другой носитель тепловой энергии. Выделившиеся после нагрева горючие летучие вещества ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$

и другие) в случае растопки напрямую подаются в горелочные устройства (18) котла, после растопки они могут накапливаться в специальном газовом хранилище-ресивере (23), при определенном давлении и в дальнейшем могут использоваться для стабилизации горения факела.

Данный процесс получения летучих горючих из угля не является процессом газификации угля. Технологии газификации более сложные и дорогостоящие. Однако рассматриваемый процесс отличается от процессов высокотемпературного пиролиза и газификации тем, что нагрев осуществляется только до температур, необходимых для выхода горючих летучих веществ, в необходимом объеме и с достаточной теплотой сгорания, которые зависят от характеристик угля.

По результатам экспериментальных исследований, можем сделать вывод, что для использования в котле в качестве растопочного топлива достаточно греть уголь до температур 350-450°C. Получаемый горючий газ, при сравнительно невысоких температурах нагрева, выделяется в необходимом объеме и обладает достаточной теплотой сгорания, чтобы быть использованным в процессе растопки котлов, тем самым может заменить дорогостоящий и затруднительный в эксплуатации мазут.

#### Литература:

1. Дукенбаев К.Д. Энергетика Казахстана. Том 1 Алматы, Гылым, 1995, 276с
2. Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Казахстан: энергетическая безопасность, энергетическая эффективность и устойчивость развития энергетики. Алматы. 2010, Гылым, 277с
3. Надиров Н.К. Нефть и газ Казахстана, Алматы, Гылым 1995
4. Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание Казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных, Алматы 2012. Гылым, 304с
5. В.А. Дубровский, М.В. Зубова. Энергосберегающие системы растопки и подсветки факела топочных камер котлов: Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012.
6. Вербовецкий Э. Х., Котлер В.Р. Замена мазута углем при растопке и подсветке факела в пылеугольных котлах//Энергохозяйство за рубежом. 1984. № 1. с.16–17.
7. Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К. и др. Чистые угольные технологии: теория и практика – Караганда: «TENGRILtd», 2013. – 276 с.
8. Алияров Б.К., Мергалимова А.К. Способ безмазутной растопки котлоагрегатов. Патент на полезную модель №2450, гос реестр полезных моделей РК, 2017.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЗАХСТАНСКИХ УГЛЕЙ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ

**Автор:** Мергалимова А.К.

**Организация:** Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан

#### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования трех видов углей на пригодность получения газообразного топлива, в достаточном объеме и с необходимой теплотой сгорания.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, уголь, котельный агрегат, растопочное топливо, мазут, газ, летучие горючие вещества.

Среди стран СНГ Казахстан занимает второе место по запасам и добыче угля и первое место - по добыче угля на душу населения. Наибольший объем добычи угля в республике приходится на Центральный (Караганда) и Северо-Восточные (Павлодар) регионы - 96,2%. Экспорт угля Казахстана в 2003 году составил 25,7 млн.т при общем объеме добычи свыше 89 млн. тонн [2]. В настоящее время Казахстан входит в число десяти крупнейших производителей угля на мировом рынке, так же как и в десятку крупнейших экспортеров. Республика дает около 3% общемирового экспорта угля. Нужно отметить, что потребность в энергетическом угле с каждым годом будет возрастать не только в Казахстане, но и в мире в целом. По некоторым данным в ряде развивающихся стран потребность в угле ежегодно будет возрастать на 6%. Рост потребления энергетического угля обуславливается потребностью в немногочисленных тепловых электростанциях, которые вырабатывают все больше электрической и тепловой энергии. Следовательно, добыча угля и разработка новых угольных месторождений будет интенсивно увеличиваться.

С целью получения газообразного топлива, способного заменить растопочный мазут на пылеугольных станциях, были экспериментально исследованы три вида твердого топлива, месторождения которых находятся в Казахстане: бурый уголь «Майкубенское», бурый уголь «Шубаркульское» и бурый уголь «Сарыадырское».

Предварительно обработанный образец угля (частица размером около 5 мм) помещалась на подложку в экспериментальной камере. Далее проводилось плавное повышение напряжения на нагревателе, что приводит к повышению температуры. В

результате повышения температуры начинается процесс термической деструкции образца, тем самым инициируя возгонку летучих соединений.

Эксперименты проводились в атмосфере азота при заданном давлении, не превышающем допустимое максимальное давление камеры.

В процессе эксперимента измеряется динамика температуры в определенных точках образца для построения картин динамики теплового поля. В ходе и после завершения эксперимента производится отбор и анализ проб газа из камеры. Отбор проб газа производится непосредственно из камеры и через полимерный пневмошланг поступает на фильтр-регулятор LFR-1/4-D-5M-MINI. Это устройство позволяет отбирать пробу газа, не оказывая влияние на давление в камере, а также удаляет из газа аэрозольную фазу и пылевые частицы. После фильтра-регулятора газ поступает на хроматограф Agilent 7890, с помощью которого производится анализ получаемого газа.

Продолжительность эксперимента ограничивалось достижением заданного значения максимальной температуры 600 °С.

Результаты экспериментальных исследований по определению количественного состава газа, полученного из представленных выше образцов углей различных месторождений, представлены в таблице 1 и рис 1.

На рисунке 1 приведены зависимости выходов основных горючих компонентов газа (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) от температуры в интервале 300–600 °С, в таблице 1 представлены их суммарные выходы.

Таблица 1 – суммарный выход горючих компонентов газа (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) в диапазоне температур от 300 °С до 600 °С

Месторождение образцов угля	Суммарный выход CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> (в об. %) в зависимости от температуры нагрева, °С			
	300	400	500	600
Шубаркульское	1,2	4,56	12,32	18,71
Майкубенское	0,9	3,22	8,41	10,85
Сарыадырское	0,5	2,13	5,2	6,70

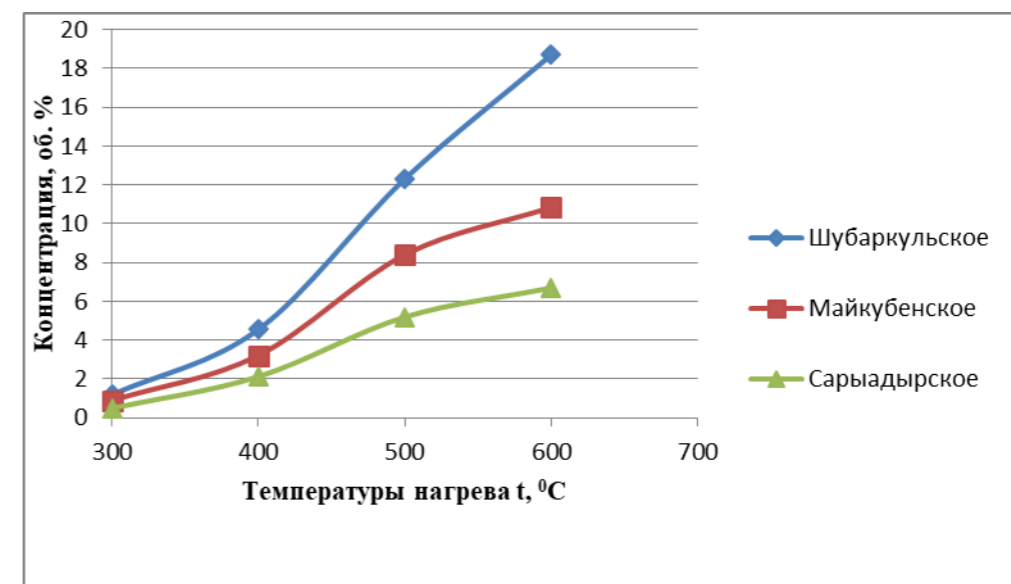


Рисунок 1 – Зависимость выхода горючих компонентов газа (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) от температуры нагрева

По результатам проведенных экспериментов видно, что с повышением температуры нагрева образцов угля в диапазоне от 300 до 600 °С, увеличиваются объемные концентрации горючих компонентов газа. Состав газа также с повышением температуры существенно изменяется. В таблице 2 представлен состав газа, получаемого из Шубаркульского каменного длиннопламенного угля.

Таблица 2 – Состав газов из Шубаркульского длиннопламенного угля

Температура нагрева t, °С	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> S	CO	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CH <sub>4</sub> и гомологи	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
300	18,2	9,0	11,3	21,2	30,1	6,3	3,9
400	14,4	8,4	9,6	31,6	21,2	10,4	4,4
500	6,2	6,2	4,6	40,3	14,4	24,8	5,7
600	5,0	5,2	2,2	41,4	6,8	34,3	6,2

По результатам определения количественного состава газа, представленных в таблице 2, можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры нагрева снижается выход диоксида углерода CO<sub>2</sub>, что благоприятно сказывается на теплоте сгорания газа, и увеличивается выход CH<sub>4</sub>. Также наблюдается повышение выхода смолистых веществ, в особенности у угля месторождения «Шубаркульское», который является длиннопламенным.

Результаты расчета теплоты сгорания, получаемого газа из представленных образцов углей при различной температуре нагрева, показали, что с повышением

температуры нагрева повышается и теплота сгорания горючих газов, получаемых из образцов угля. У всех рассматриваемых образцов углей максимальное значение теплоты сгорания прослеживается при температуре нагрева 600 °С. Наибольшее значение наблюдается у каменного угля Шубаркульского месторождения – 29,1 МДж/м<sup>3</sup>, а минимальное значение у бурого угля Сарыадырского месторождения – 13,5 МДж/м<sup>3</sup>.

По результатам экспериментальных исследований можем сделать вывод, что из трех представленных углей для получения горючего газа, наиболее подходят угли Шубаркульского и Майкубенского месторождений. Для использования в котле в качестве растопочного топлива достаточно греть уголь до температур 350-450°С. Получаемый горючий газ, при сравнительно невысоких температурах нагрева, выделяется в необходимом объеме и обладает достаточной теплотой сгорания, чтобы быть использованным в процессе растопки котлов, тем самым может заменить дорогостоящий и затруднительный в эксплуатации мазут.

#### Литература:

1. Надиров Н.К. Нефть и газ Казахстана, Алматы, Гылым 1995
2. Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание Казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных, Алматы 2012. Гылым, 304с
3. В.А. Дубровский, М.В. Зубова. Энергосберегающие системы растопки и подсветки факела топочных камер котлов: Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012.
4. Вербовецкий Э. Х., Котлер В.Р. Замена мазута углем при растопке и подсветке факела в пылеугольных котлах//Энергохозяйство за рубежом. 1984. № 1. с.16–17.
5. Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К. и др. Чистые угольные технологии: теория и практика – Караганда: «TENGRILtd», 2013. – 276 с.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ВИДА ТОПЛИВА

**Автор:** Саракешова Н.Н.

**Организация:** Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан

Развитие высокоэффективных энергосберегающих технологий является на сегодняшний день задачей государственной важности. Это объясняется, в основном, значительно более высокой (в 3 - 4 раза), чем в экономически развитых странах Западной Европы и Америки, энергоемкостью промышленного и сельскохозяйственного производства, значительными затратами энергии в жилищно-коммунальном хозяйстве, приводящими к нерациональному расходованию невозполняемых запасов органического топлива, излишним затратам общественного труда. Принятый закон Республики Казахстан от 13 января 2012 года № 541-IV «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 15.01.2019 г.), последовавшие за ним подзаконные акты определяют основные направления деятельности научных и производственных организаций, в том числе в повышении и в развитии энергосберегающих технологий.

Одним из направлений экономии невозполняемых запасов органического топлива является применение для генерации установок, работающих с использованием энергии возобновляемых источников. Генерация электроэнергии и теплоты на установках, использующих энергию возобновляемых источников, является на сегодняшний день одним из бурно развивающихся направлений развития мировой энергетики. Доля энергии, генерированной с их применением в общем энергетическом балансе, со временем непрерывно возрастает.

Традиционно к возобновляемым источникам относят энергию солнца, ветра, геотермальную энергию Земли, гидроэнергию. Возобновляемым источником энергии является также и биотопливо. К биотопливу относятся древесина, солома, продукты переработки растительной массы, а также отходы животноводства и птицеводства. Биотопливо используется в твердом, жидком и газообразном виде. Биотопливо в газообразном виде носит название биогаз.

Истощение запасов нефти и традиционных энергоресурсов, рост цен на них и обострение экологических проблем обусловили глобальный интерес к разработке и использованию биогазовой технологии для получения механической, тепловой,

электрической энергий и биоудобрений. Биогазовая технология может быть использована для переработки многих видов органических отходов, навоза, сточных вод, отходов сельскохозяйственных культур и производства, улучшая экологическую обстановку местности. Тот факт, что животные неполно усваивают энергию растительных кормов и более половины этой энергии уходит в виде навоза, позволяет рассматривать последний не только как ценное сырье для органических удобрений, но и как мощный возобновляемый источник энергии.

Одним из путей рациональной утилизации навоза и других органических отходов является их анаэробное сбраживание, что обеспечивает обезвреживание и сохранение их как органического удобрения при одновременном получении биогаза.

Биогаз - это смесь из 50 - 80% метана  $\text{CH}_4$ , 20 - 50% углекислого газа  $\text{CO}_2$ , 1% сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и незначительных следов азота  $\text{N}_2$ , кислорода  $\text{O}_2$ , и водорода  $\text{H}_2$ , а так же продуктов метанового брожения органических веществ растительного и животного происхождения, осуществляемого специфическим природным биоценозом анаэробных бактерий различных физиологических групп. Энергия, заключенная в 1 м<sup>3</sup> биогаза (20-25 МДж), эквивалентна энергии 0.6 м природного газа, 0.74 л нефти или 0.66 л дизельного топлива. Соотношение  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  зависит от исходного субстрата и характеристики процесса брожения (температуры, времени пребывания массы в реакторе и загрузки его рабочего пространства).

Использование биогаза как топлива возможно как при его сжигании в котлах для производства теплоты в виде пара или жидкого теплоносителя, так и при сжигании в камерах сгорания газотурбинных установок и в цилиндрах газопоршневых агрегатов. Наличие в сыром биогазе значительной доли (30 - 50 %) негорючих газов, в первую очередь двуокиси углерода, делает использование биогаза в ГТУ и ГПА более предпочтительным, чем в котлах, т.к. в этих случаях  $\text{CO}_r$  выступает в качестве части рабочего тела этих установок. При сжигании же в топках котлов  $\text{CO}_2$  является балластом. Однако сжигание биогаза в котлах для получения теплоты также нашло практическое применение, и использование такого рода установок может привести к достижению положительного результата.

Теплотворная способность биогаза оставляет 22.29 МДж/ м и 1 м<sup>3</sup> его эквивалентен 0,7-0,8 кг условного топлива. В результате брожения из 1 т органического вещества (по сухой массе) получается 350.600 м<sup>3</sup> биогаза, при этом КПД превращения энергии органических веществ в биогазе 80.90%. [5, с. 15-30, 4, с. 141, 6, с. 11-15].

Эффективность использования биогаза составляет 55% для газовых плит, и от 24% для двигателей внутреннего сгорания. Наиболее эффективный путь использования

биогаза - это комбинация тепловой и электрической энергии, при которой можно достичь до 88% эффективного КПД, что является лучшим видом использования биогаза для крестьянских ферм и отдельных хозяйств [7, с.72-77].

По своему химическому составу, биогаз напоминает природный газ и может быть применен в автотракторных двигателях внутреннего сгорания. По данным Шведских и Швейцарских ученых, биогаз может использоваться в ДВС, так как по экологическим характеристикам биогаз на 75% чище дизельного топлива и на 50% чище бензина. Токсичность биогаза для человека на 60% ниже традиционного топлива. Продукты его сгорания практически не содержат канцерогенных веществ. Влияние отработавших газов двигателей, работающих на биогазе, на разрушение озонового слоя на 60 - 80% ниже, чем у нефтяных видов топлива [8, с. 2-3].

Однако создание ДВС, работающих на газе с такой низкой теплотой сгорания как у биогаза, представляет определенные трудности. Они обусловлены необходимостью сохранения мощности и экономичности работы базового двигателя на эксплуатационных режимах, сохранения его надежности, обеспечения устойчивости на всех режимах, минимальных конструктивных доработок базового двигателя и т.д. В этой связи целесообразнее использовать не биогаз, а получаемый из него биометан. Для этого из биогаза удаляют  $\text{CO}_r$ , водяной пар, сероводород и другие примеси. Очистка биогаза от двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) может производиться различными способами. К наиболее распространенным методам относятся: промывка газов через жидкие поглотители (например, воду), вымораживание, адсорбция при низких температурах, после чего полученный газ имеет практически однородный состав, содержащий 90,97 %  $\text{CH}_4$  с теплотой сгорания 35,40 МДж/м<sup>3</sup>. [9, с. 92-104, 6, с.11-15, 10, с.56, 11, с. 140-160].

Переработанные в биогазовых реакторах органические отходы превращаются в ценные биоудобрения, которые содержат значительное количество питательных веществ, и могут быть использованы в качестве органических удобрений и кормовых добавок. Образующиеся при сбраживании гумусные материалы улучшают физические свойства почвы, а минеральные вещества, служат источником энергии и питанием для деятельности почвенных микроорганизмов, что способствует повышению усвоения питательных веществ растениями. Основное преимущество биоудобрения заключается в сохранении легко усваиваемой формы практически всего азота и других питательных веществ, содержащихся в исходном сырье [10, с. 56, 12, с. 52-29].

Точность определения эффективности применения энергосберегающих мероприятий в энергогенерирующих установках, представительность полученных при анализе результатов в значительной степени зависит от правильного выбора критериев и методов

оценки эффективности. Так, при исследованиях эффективности работы установок одновременно генерирующих энергию различных видов (например, электроэнергию и теплоту) предпочтительно использовать эксергетический метод термодинамического анализа, основанный на определении эксергетического КПД установки. В настоящей работе предложена модификация эксергетического метода термодинамического анализа, то есть метод разности эксергетических КПД. Предложенный метод основан на определении изменения эксергетического КПД установок после проведения каких-либо энергосберегающих мероприятий - технологических или конструктивных усовершенствований, направленных на повышение их энергетической эффективности, и влияния различных факторов на это изменение эксергетического КПД. Предложенный метод, принципиально не отличаясь от традиционного метода эксергетического анализа, позволяет упростить оценку эффективности внедрения энергосберегающего мероприятия, особенно в тех случаях, когда существует несколько возможных способов повышения энергетической эффективности работы какого-либо устройства, сравнить ожидаемые результаты внедрений энергосберегающих мероприятий между собой.

Непрерывное увеличение потребление газа в мире, а также повышенные экологические требования к действующим и создаваемым энергетическим объектам, необходимость значительного повышения энергетической эффективности экономики Казахстана требуют существенного развития научных исследований в этой области знаний. Настоящая работа - это попытка внести посильный вклад в развитие научных знаний в области повышения эффективности работы энергогенерирующего оборудования энергетических систем и комплексов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов, Н. Г. Альтернативные виды моторного топлива из биосырья для сх автотракторной техники, достижения науки и техники в АПК, № 2, 2002. стр11-15.
2. Schumacher L.G., Borgelt S.C., Hires W.G.: Fueling a Diesel Engine with methyl ester soybean oil. // Liquid Fuels from Renewable Resources-Proceedings of an Alternative Energy Conference. Nashville, TN. 1992.
3. Мамедова М.Д., Васильев Ю.Н. Транспортные двигатели на газе. М.: Машиностроение, 1994. -224 с.
4. Ибрагим Ахмед Руфай. Использование вторичного тепла автономных энергоустановок для анаэробной переработки навоза. Диссертация ФГОУ ВПО "Ргаг университет МСХА имени К. А. Тимирязева, канд. тех. наук. -М.: 2006. 140 с.

5. В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер, Биогаз Теория и Практики, перевод с немецкого и предисловие М. И. Серебряного, УДК 631.371:63.002.8 Москва, КОЛОС, 1982,15- 140с.
6. Кириллов, Н. Г. Альтернативные виды моторного топлива из биосырья для сх автотракторной техники, достижения науки и техники в АПК, № 2, 2002. стр11-15.
7. Чумаков В.Л., Эффективное использование продуктов анаэробного сбраживания навоза. Текст./ Чумаков В.Л., Имад С.С. Белаль. // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. Горячкина. Агроинженерия. № 3(23) 2007.- С. 72-77.
8. Кримов Николай. На чем поедем в XXI веке?: Альтернативные моторные топлива. // Энергетика и промышленность России. №3., 2002.
9. Гелатуха Г.Г., Железная Т.А., Маценюк З.А. Концепция развития биоэнергетики в Украине./ Промышленность техника, 1999. Т.21. №.6. С. 94-102.
10. AOAD, Agricultural Information, Documentation and Statistics Center, 2003.

## ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ В УСТАНОВКАХ С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ПО МЕТОДУ ГАЛОТЕР

**Авторы:** Петров М.С., Салихов Р.М., Айбульдинов Е.К.

**Организация:** ООО «ТТУ», г. Санкт-Петербург, Россия; АО «Казахский университет технологии и бизнеса», г.Нур-Султан, Казахстан

**АННОТАЦИЯ.** Разработана технология, позволяющая эффективно перерабатывать низкосортные горючие ископаемые - сланцы, угли, битумы, лигниты, шунгиты, твердые бытовые и промышленные отходы. Продукты переработки - нефть, газ, кокс, тепло-и электроэнергия, синтез-газ, метанол, пропилен, строительные материалы, ферросплавы, клинкер и карбиды. Экологические параметры соответствуют нормам ЕС. Данная технология может послужить основой для расширения добычи неиспользуемых месторождений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Низкосортное топливо, переработка, пиролиз, горючие сланцы, уголь, твердые бытовые отходы, тяжелые нефтяные остатки.

**ВВЕДЕНИЕ.** Эффективность добычи и переработки запасов полезных ископаемых зависят от эффективности технологий переработки добываемого сырья. Огромные неиспользуемые запасы углеводородов и чистого углерода имеются в нетронутых природных залежах низкосортного ископаемого топлива, а также в техногенных залежах - на полигонах твердых бытовых и промышленных отходов. Например, запасы бурого угля в России составляют триллионы тонн, а добыча-около 70 миллионов тонн в год. На территории России расположено около 180 месторождений горючих сланцев с запасами сланцевой нефти 190 млрд. тонн, из них 10 млрд. тонн горючих сланцев в Ленинградской области с нефтяным эквивалентом от 1 до 1,5 баррелей на тонну. В Карелии имеются запасы 1 млрд. тонн шунгита с содержанием углерода 30-90%. На территории России накоплено более 31 миллиарда тонн твердых бытовых отходов. Ежегодно их объем увеличивается на 60 миллионов тонн.

Все перечисленные выше ископаемые классифицируются как низкосортные горючие ископаемые, то есть, как ископаемые с физико-химическими характеристиками, затрудняющими их включение в топливно-энергетический баланс из-за высокой зольности, влажности или низкой температуры плавления золы, либо наличия и образования опасных веществ. Наличие эффективных технологий позволяет использовать

эти огромные ресурсы. Установки с твердым теплоносителем (УТТ) могут успешно работать с применением различных режимов - полукоксования, коксования, парового пиролиза, окислительной паровой газификации. Такая гибкость позволяет получать различные целевые продукты в различных пропорциях: синтетическую нефть, газ, кокс, тепло-и электроэнергию, синтез-газ с последующим получением метанола, пропилена и полимеров. Полученная зола не содержит углерода и может быть использована для производства строительных материалов, цемента, ферросплавов, карбидов, удобрений и др., что обеспечивает безотходность производства. Установки УТТ являются экологически чистыми - они работают в границах городов Европейского Союза.

**ТЕХНОЛОГИЯ И РЕФЕРЕНЦИИ.** Технология высокоскоростного пиролиза горючих сланцев в установках с твердым теплоносителем основана на методе Галотер, изобретенном в 1947 году инженером И. С. Галынкером и разработанном Энергетическим институтом ЭНИН (Москва). Сущность способа заключается в том, что пиролиз сырья происходит при его смешивании с горячей золой во вращающемся барабане реактора без доступа кислорода. Органическое вещество разлагается с образованием парогазовой смеси, которая при охлаждении образует различные фракции синтетических нефти и газа. Полукокс сжигается в аэрофонтанной топке. Часть горячей золы возвращается в реактор для нагрева свежей порции сырья, избыток золы охлаждается и удаляется из процесса. Тепло золы, дымовых газов и синтез-газа используется в котле-утилизаторе для получения пара с энергетическими параметрами для производства тепловой и электроэнергии. Технология освоена на коммерческом уровне.

Семь установок УТТ, построенных в Эстонии, были спроектированы при участии специалистов ООО «ТТУ». В Нарве с 1980-84 годов эффективно работают две установки УТТ-3000 мощностью по 1 млн. тонн сырья в год каждая. В 2009 году они были переименованы в Enefit-140. В 2006-2015 годах в Кохтла-Ярве были спроектированы, построены и введены в эксплуатацию три УТТ-3000, переименованные в Петротер. Две УТТ-500 построены в Кивиыли в 2005-2009. Еще один завод «Энефит-280» был построен под Нарвой в 2009-2012 гг. без участия специалистов ООО "ТТУ", он работает в режиме опытно-промышленной установки. В целом за 2006-2015 годы построено шесть заводов, обеспечивающих 365% прироста мощностей по переработке сланца методом Галотер с 2,0 до 7,8 млн. тонн в год. Инвестиции составили около 600 миллионов долларов, а добыча достигла более 8 миллионов баррелей нефтяного эквивалента в год. Сейчас в Эстонии сланцы при помощи процесса Галотер приносят синтетическую нефть, газ, тепло- и электроэнергию, ценные химические продукты и строительные материалы из сланцевой золы.

Специалисты ООО «ГТУ» за период 2009-2020 провели дополнительные исследования и разработки, учли опыт работы эстонских заводов и усовершенствовали технологические схемы, позволяющие получать из сланца и низкосортных топлив не только синтетическую нефть, газ, тепло и электроэнергию, но и продукты с более высокой добавленной стоимостью и меньшей зависимостью от колебаний мировых цен на нефть - тиофены, фенолы, кокс, синтез-газ с возможностью дальнейшего производства метанола, чистых топлив, олефинов и полимеров, вырабатываемая электроэнергия может использоваться для плавки золы с добавлением марганцевой руды, угля, кокса и с получением клинкера, ферросплавов и карбидов.

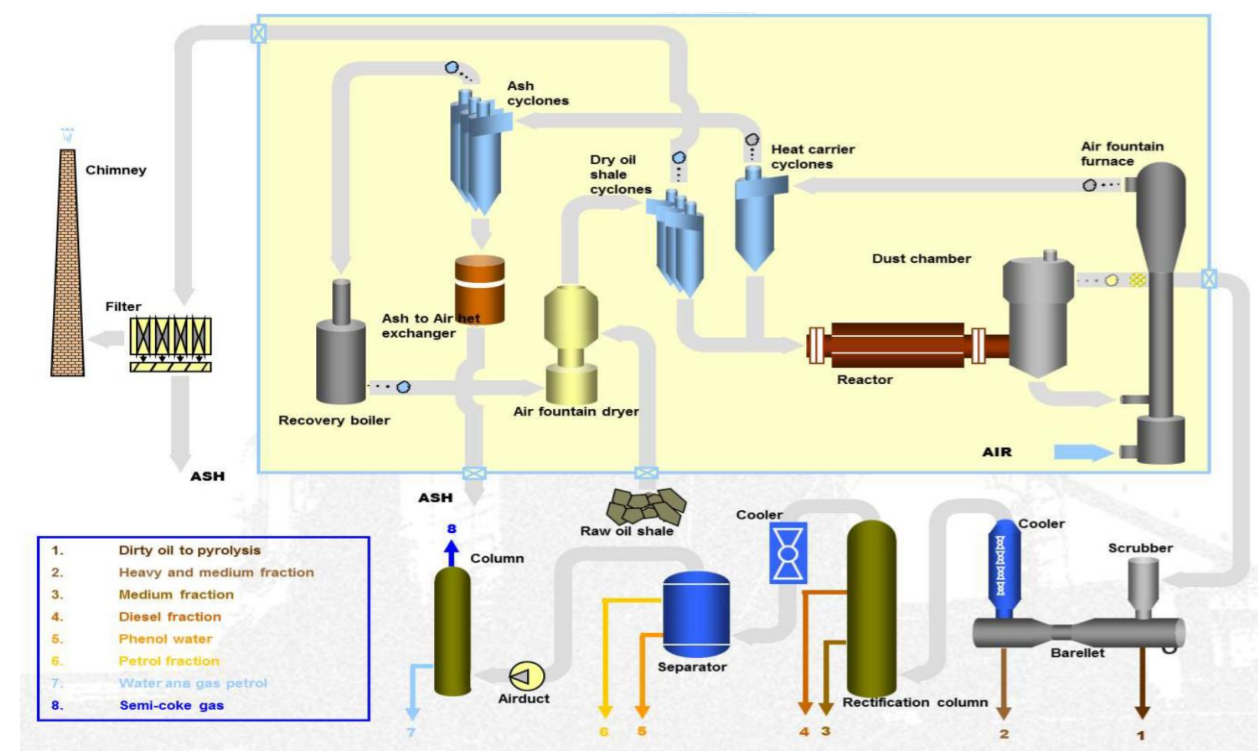


Рисунок 1-принципиальная схема переработки низкосортного топлива в УТТ

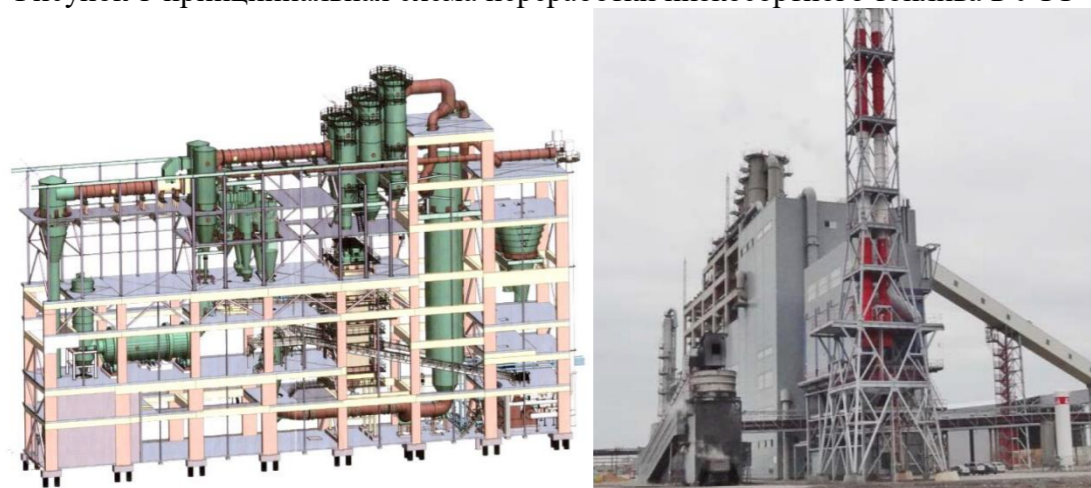


Рисунок 2-компоновка и общий вид установки УТТ

ПЕРЕРАБОТКА УГЛЯ. Пример демонстрирует исследования образца угля из Казахстана с плавкой золы и производством ферросплавов [1-3].

Влажность  $W_a = 6,03\%$ , Зольность  $A_d = 8,31\%$ , Элементный состав % масс. на сухое состояние - C - 69,14 - 68,86; H - 6,36 - 5,86; N - 1,86 - 1,74; S - 0,4.

Выход продуктов полукоксования по Фишеру, в % мас. на сухой уголь составил: полукокс - 72,6; смола - 10,1; вода пирогенетическая - 7,7; газ - 9,6.

Смола полукоксования имеет элементный состав, % мас.: C 78,75 - 79,07; H 8,84 - 8,35; N 0,97 - 1,11; S - 1,16.

Элементный состав полукоксового газа: C 73,46%; H 18,62%; N 0,44%; S 0,3% ; O 7,18%.

Полукокс из реторты имеет следующие характеристики:

- зольность  $A_d = 11,03\%$  масс; выход летучих  $V_d = 13,44\%$  масс; элементный состав: C- 74,52%; H- 3,89%; N-2,47%; S- 0,35%; O- 7,74%.

Полученный коксозольный остаток после удаления летучих при 850°C в течение 7 минут (кокс) имеет:

- Зольность 12,35% масс;  
- элементный состав: C- 77,23%; H-1,14%; N- 2,43%; S-0,19%; O- 6,66%.

Зола легко отделяется от кокса в магнитном и электрическом полях.

Зола угля имеет состав:  $SiO_2 - 53\%$ ;  $Fe_2O_3 - 11\%$ ;  $Al_2O_3 - 27\%$ ,  $CaO - 2,5\%$ ,  $MgO - 1,3\%$ ,  $SO_3 - 1,2\%$ ,  $TiO_2 - 1\%$ ,  $P_2O_5 - 0,65\%$ ,  $Na_2O - 0,65\%$ ,  $K_2O - 1,9\%$ .

Охлажденный до 90°C коксозольный остаток (КЗО) выводится в систему разделения КЗО на зольный и коксовый концентраты.

Зольный концентрат смешивается с марганцевой рудой и подается в индукционные тигельные плавильные печи, где получают ферросплав и шлак. Ферросплав охлаждается, дробится и складывается.

Коксовый концентрат брикетируется и складывается для отгрузки потребителям. В качестве связующего используется окисленная тяжелая фракция смолы.

Экономические параметры проекта переработки 1 млн. т в год такого угля приведены в таблице ниже:

	Количество ед/сут	Цена, \$/ единицу	Сумма, \$/ сут	Годовые показатели, \$
Инвестиции, в т.ч.:				
Установка УТТ			123 820 164	
Электростанция ЭС			70 000 000	
Сепараторы, брикетирование			50 321 239	
Индукционные печи			1 166 308	
			2 332 617	

Затраты, в т.ч.:			95 778	28 733 504
Добыча	3 336	10	33 360	10 008 000
Переработка	3 336	7	23 352	7 005 600
Сепарация КЗО, плавка, брикет-ие	1 255	10	12 554	3 766 087
Покупка марганцевой руды, т	161	164,37	26 513	7 953 817
Амортизация			22 616	6 784 667
Выручка, в т.ч.:			502 488	150 746 417
Масло, т	240	455	109 166	32 749 809
Электричество, kW-h	2 542 459	0,025	63 561	19 068 441
Ферросплав, т	215	1 048	225 097	67 529 205
Кокс, т	1 047	100	104 663	31 398 962
Прибыль			406 710	122 012 913
Прибыль к налогообложению			384 094	115 228 246
Прибыль после налогообложения			307 275	92 182 597
Поток наличности			329 891	98 967 263
Окупаемость, дней			375	
Окупаемость, лет			1,25	1,25
Рентабельность инвестиций, %/год	80%			
Доход с 1 т угля, долл/т		115		

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Наличие отработанной и эффективной технологии переработки позволяет вовлекать низкосортные ископаемые природных и техногенных месторождений в торговый баланс промышленности с высоким социально-экономическим эффектом.

1 Патент RU 2 320 699 C1 Способ и установка термической переработки высококалорийных и низкокалорийных твердых топлив // Опубликовано 27.03.2008 Бюл. № 9.

2 Патент RU 2 334 777 C1 Способ и установка для термической переработки мелкозернистого топлива // Опубликовано 27.09.2008 Бюл. № 27.

3 Патент RU 2 340 650 C1 Способ и установка для термической переработки высококалорийного твердого топлива // Опубликовано 10.12.2008 Бюл. № 34.

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

**Авторы:** Карманов А.Е., Приходько Е.В., Талипов О.М.

**Организации:** Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г.

Павлодар, Казахстан

Поиск альтернативных источников энергии стал одной из главных проблем экономически развитых государств. Используя отходы, можно значительно экономить энергетические и сырьевые ресурсы, снижать загрязнение окружающей среды, а также создать большое количество дополнительных рабочих мест.

Задача производства эффективного и экологичного топлива из возобновляемых и неиспользуемых отходов является достаточно актуальной, решая проблемы утилизации практически бесполезных, а зачастую и вредных отходов. Кроме того, потребители получают дополнительный источник эффективного топлива, в том числе и для энергетических целей.

В настоящее время производство электроэнергии основано на использовании невозобновляемых источников энергии - преимущественно углеводородов, таких как газ, нефтепродукты, уголь. На невозобновляемые источники энергии суммарно приходится примерно 92 % мирового топливно-энергетического баланса, на возобновляемые – около 3,4 % [1].

В то же время в последней четверти XX века в мире произошла активизация строительства установок по получению энергии из бытовых и промышленных отходов. По данным аналитиков к 2015 году потребление биотоплива для выработки энергии выросло в Европе с 3 до 12 миллионов тонн, а в 2020-м уже будет составлять 21 миллион тонн.

После первой Всемирной Конференции биотопливных ресурсов, проведенной в сентябре 2000 года в Стокгольме, где рассматривались разнообразные вопросы применения топливных брикетов, отрасль альтернативного топлива получила толчок к развитию в мировом масштабе. Существуют различные способы переработки возобновляемых и неиспользуемых отходов. Наиболее эффективным из них является брикетирование. Сейчас топливные брикеты являются популярным топливом благодаря своей экономичности. Они уже получили широкое распространение по всему миру.

Использование топливных брикетов как альтернативного, экологически чистого и эффективного вида топлива весьма перспективно.

За рубежом наиболее серьезными странами-производителями (а также и потребителями) брикетов являются [2]:

- Европа – 3,0 млн. тонн в год;
- США около 2000 тыс. тонн в год;
- Германия около 100 тыс. тонн в год;
- Швеция около 650 тыс. тонн в год;
- Австрия около 110 тыс. тонн в год;
- Канада около 110 тыс. тонн в год;
- Финляндия около 100 тыс. тонн в год;
- Англия около 10 тыс. тонн в год;
- Япония около 3 тыс. тонн в год;
- Дания около 500 тыс. тонн в год.

По исследованиям маркетологов в ближайшее время ожидается увеличение спроса в мире на этот вид продукции, в том числе и в Казахстане. В нашей стране этот рынок еще не сформирован и требует продвижения. Потребители оплачивают топливные гранулы не только по стоимости за массу продукции, а и по количеству выделенной тепловой энергии.

На сегодняшний день казахстанских стандартов на брикеты не существует. Производители ориентируются на западные стандарты. В Европе также не существует единого европейского стандарта, и в разных странах они значительно отличаются друг от друга.

Процесс брикетирования позволяет значительно увеличить объемную калорийность исходного сырья. Концентрация в минимальном объеме полезных горючих свойств биомассы является главной целью брикетирования.

В результате получают плотное экологически чистое топливо, превосходящее по калорийности обычные дрова. Большим достоинством брикетов является постоянство температуры при сгорании на протяжении 4 часов. Брикеты горят с минимальным количеством дыма, не стреляют, не искрят. При этом обеспечивают постоянную температуру на всем протяжении горения.

Топливные брикеты – спрессованные изделия цилиндрической, прямоугольной или любой другой формы из остатков (отходов) биомассы, образующихся в процессе основного производства. Их длина (обычно 100-300 мм) не должна превышать в пять раз их диаметр, который является большим, чем 25 мм. Как правило, он составляет 60-75 мм.

Таким образом, отходы деревопереработки, химических производств, переработки сельскохозяйственной продукции, торфоразработок, полиграфической, пищевой и

текстильной промышленностей – все они могут быть превращены в высококачественное топливное сырье. Брикеты производят исключительно из натурального сырья, без использования каких-либо добавок и связующих компонентов.

Рассмотрим в качестве сырья для брикетирования животноводческие и птицеводческие предприятия использующие «подстилку» для животных и птиц (чаще всего – опилки, перемешанные с пометом). Расход различных видов подстилки составляет от 8 до 20 кг на одну голову птицы в год.

Утилизация подстилки доставляет птицеводческим хозяйствам немало хлопот. Для его хранения и переработки нужны большие земельные участки.

Также можно использовать опавшие листья вперемешку с отсевом угля, которого не возможно без брикетирования сжечь в колосниковых решетках.

При брикетировании вместо связующего материала будет служить лигнин, который содержится в опавших листьях, это позволяет удешевить брикеты из угля.

Применение топливных брикетов с каждым годом находит всё новые и новые сферы применения.

Топливные брикеты и гранулы предназначены для сжигания в заводских котельных и ТЭЦ, в печах, ж/д транспорте, каминах, теплицах, на любых промпредприятиях, где имеются установки, работающие на твердом топливе. Древесные брикеты и гранулы также используются в качестве технологического сырья на гидролизных и биохимических предприятиях, для производства таннидов на дубильно-экстракционных заводах.

На сегодняшний день брикеты используются во многих видах топок. Еще довольно часто этот вид топлива использует в котлах центрального отопления. Особо топливные брикеты ценятся за то, что поддерживают постоянную температуру при сгорании – это обуславливает их форма рисунок 1.



Рисунок 1 – Горение брикетов в топке водогрейного котла

Достоинствами топливных брикетов являются:

- высокая продолжительность горения – по сравнению с обычными дровами, закладку в топку можно производить реже в три раза. Брикет горит с минимальным количеством дыма, не стреляют, не искрят. Преимуществом брикетов является постоянство температуры на протяжении всего периода сгорания (от 30 мин до 4 часов). Всего один брикет может гореть в течение четырёх часов - вряд ли такого результата можно добиться от обычных дров или угля. Дополнительный плюс брикетов заключается в том, что они горят практически без дыма и копоти. Продукты сгорания (зола) могут также использоваться в качестве экологически чистого удобрения;

- высокая теплотворность – теплотворность топливных брикетов больше, чем у обычных дров, и практически равна теплотворности каменного угля. При сжигании 1000 кг топливных брикетов из растительных отходов выделяется столько же тепловой энергии, как при сжигании: 1600 кг древесины, 478 м<sup>3</sup> газа, 500 л дизельного топлива, 1000 кг угля, 685 л мазута, 1200 кг торфа.

Положительным аспектом при использовании брикетов в виде топлива является их минимальное влияние на окружающую среду при сгорании, по сравнению с классическим твердым топливом при одинаковой теплотворной способности.

Потенциальные потребители на внутреннем рынке пеллет показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Потенциальные потребители на рынке топливных брикетов

Потребительский сегмент	Перспективы развития
Частный сектор рядом с крупными городами или городами с большим уровнем доходов	Пиролизные котлы для сжигания брикетов, устанавливаемые в частных коттеджах, доступны по цене гражданам с доходом выше среднего – их стоимость оценивается в несколько тысяч евро.
Отдельно стоящие здания площадью до нескольких тысяч квадратных метров	Использование котлов для сжигания топливных брикетов экономически оправдано за счёт снижения эксплуатационных затрат. Данный котёл не требует постоянного обслуживания, работает в автоматическом режиме, и нуждается в периодическом подвозе брикетов и чистке от золы, что может выполняться раз в 2-3 недели.
Коттеджные посёлки с центральным отоплением	Строительство отопительной котельной позволяет снизить стоимость вложений в отопительную инфраструктуру и увеличить доходность бизнеса за счёт продажи тепловой энергии и ГВС жителям посёлка - при

	условии, что котельная находится в собственности инвестора. То же самое можно отнести и к многоквартирным и многоэтажным домам.
Замещение котельных, использующих наиболее дорогие традиционные топлива котельными, использующих брикеты	Многие котельные и ТЭЦ требуют срочной реконструкции по причине износа и морального устаревания оборудования. По каждому такому объекту необходимо проводить детальный анализ для определения, какой вид топлива следует использовать на нем в будущем.
Государственные программы, позволяющие финансировать, строить, эксплуатировать и развивать котельные на брикетах.	Биотопливо уже вызывает практический интерес. Особенно актуально его использование в районах, где отсутствует центральное отопление.

Проведём анализ эффективности использования топливных брикетов из возобновляемой органической массы в котлах малой и средней мощности. Применение брикетов возможно по двум направлениям:

- во-первых, это «классическое» сжигание брикетов на колосниковой решётке. Это наиболее простой, но наименее эффективный из рассматриваемых способов. Достоинством является надёжность, отсутствие сложных механизмов и высокой квалификации эксплуатирующего персонала. Стоит также упомянуть о низкой зольности топливных брикетов, которая составляет до 5 %, что облегчает обслуживание водогрейных котлов. При использовании современных водогрейных котлов можно получить высокий КПД (около 70 %) и низкое содержание вредных веществ в уходящих газах. Всё это, и дополнительно отсутствие проблем с утилизацией золы (зола многих брикетов может быть использована в качестве удобрения) создаёт предпосылки для широкого использования топливных брикетов из возобновляемой органической массы при условии стоимости брикетов не выше стоимости угля.

- во-вторых, использование брикетов в котлах пиролиза. Данные агрегаты имеют более высокий КПД (по сравнению со слоевым сжиганием) за счёт меньших потерь теплоты с недожогом. Конечно, в обслуживании они сложнее, но увеличение их числа в последнее время говорит об их преимуществах.

Большинство электростанций и котельных на территории Казахстана работают на каменном угле. Исключение составляют хорошо газифицированные южные и некоторые

другие районы страны. О переводе на мазут речи быть не может. Понятно, что собственники стремятся избежать расходов и, что немаловажно, зависимости, от поставщиков энергоресурсов, монополю диктующих им цены.

Сегодня, при сравнимой калорийности, произведенные на месте топливные брикеты, обходятся дешевле, чем каменный уголь. В результате, помимо экологических преимуществ, прослеживаются четкие экономические предпосылки для использования брикетов вместо каменного угля на котлах средней и малой мощности.

Согласно проведенным нами исследованиям, теплота сгорания брикетов из органических отходов соизмерима с теплотой сгорания ряда углей. Например, брикеты из опавших листьев имеют теплоту сгорания равную теплоте сгорания Экибастузского угля.

Использование топливных брикетов как альтернативного, экологически чистого и эффективного вида топлива, весьма перспективно.

#### Литература

1. Трубников, И. А. Техничко-экономическая целесообразность производства и использования топливных брикетов, гранул и пеллет // Молодёжь и наука: Сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011.
2. <https://brikhetir.blogspot.com/> [Электронный ресурс] 18.02.2020

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЛАВЛИВАНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

**Авторы:** Сулейменов К.А., Амренов А.Б.

**Организация:** Частное учреждение «Nazarbayev University Research and Innovation System», г. Нур-Султан, Казахстан

Угольные тепловые электростанции производят более 80% всей электроэнергии, вырабатываемые всеми электростанциями Казахстана, и являются основой электроэнергетика страны. Основным топливом казахстанских угольных ТЭС являются высокочольные Экибастузские угли, доля использования которых на угольных ТЭС составляет около 90%. Энергетический Экибастузский каменный уголь относится к низкосортному углю.

Все угольные электростанции Казахстана оснащены котлами с традиционным пылеугольным (факельным) сжиганием угля. В целом можно отметить, что данная технология отвечает одному из важнейших требований, предъявляемые к топочной технике, а именно высокой эффективности сжигания твердого топлива. Но в условиях повышения требований, связанных с обеспечением защиты окружающей среды, и в частности атмосферы от вредных газовых выбросов диоксида серы ( $SO_2$ ) и оксидов азота ( $NO_x$ ), возникают проблемы и сложности по достижению требуемых экологических параметров в традиционной пылеугольной технологии. Если, по оксидам азота вопросы снижения эмиссии  $NO_x$  можно частично обеспечить за счет режимных мероприятий, изменения аэродинамики пылеугольных горелок и факела, то снижение эмиссии диоксида серы -  $SO_2$  за счет таких мероприятий невозможно, т.к. при температурах достигаемых при горении угля в топке котла 1200-1500°C (в зависимости от типа угля) практически 100% содержащейся в угле серы, переходит в  $SO_2$ .

Анализ существующих технологий сжигания показывает, что одним из перспективных направлений в решении проблемы сжигания низкосортных углей (многозольных, высоковлажных, высоксернистых, с неблагоприятной минеральной частью), включая вопросы решения экологических проблем, связанных со сжиганием органического твердого топлива, является сжигание таких углей в топках с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС).

В данном сообщении представлены некоторые результаты исследований по связыванию диоксида серы активными сорбентами золы угля и подаваемым в топку

известняком при сжигании высокозольных Экибастузских углей в экспериментальной установке ЦКС.

Известно, что диоксиды серы при определенных условиях связываются с различными щелочными соединениями и их растворами, и выводятся из процесса в твердом виде для дальнейшего использования или захоронения. Наиболее дешевыми и доступными сорбентами для связывания диоксида серы являются известняк, состоящий, в основном из карбоната кальция -  $\text{CaCO}_3$ . Не рассматривая последовательность и термодинамическую вероятность прохождения всех реакций взаимодействия  $\text{CaCO}_3$  с  $\text{SO}_2$  можно отметить, что при определенных температурных условиях в окислительной атмосфере в топке, конечными реакциями будут:



Исследованиями /1/ установлено, что диссоциация карбоната кальция (реакция 1) начинается уже при  $700^\circ\text{C}$ , в результате чего взаимодействие оксида кальция и сернистого ангидрида возможно уже при температуре выше  $700^\circ\text{C}$ , а температура разложения образовавшегося сульфата кальция -  $\text{CaSO}_4$  (реакция 2) равна  $960^\circ\text{C}$ . Таким образом, термодинамические исследования показывают, что, осуществляя процесс сжигания угля в кипящем слое в температурном диапазоне  $700-960^\circ\text{C}$  в окислительной атмосфере можно с достаточной точностью прогнозировать возможность прохождения реакция связывания диоксида серы с оксидом кальция. В то же время следует отметить, что термодинамические исследования позволяют определять вероятность той или иной химической реакции, но не позволяют определить наиболее оптимальные для процесса десульфурации условия в реальных топочных устройствах, в связи, с чем необходимо проведение экспериментальных исследований на таких установках. При этом необходимо отметить тот факт, что рабочий температурный диапазон работы топок с ЦКС составляет  $850-950^\circ\text{C}$  в зависимости от типа сжигаемого угля. Это весьма положительно скажется на прохождении процесса десульфурации в топке ЦКС.

Степень связывания диоксида серы подаваемым в топку известняком зависит не только от мольного отношения  $\text{Ca/S}$ , гранулометрического состава известняка и режимных факторов, но и от таких его характеристик как: пористость, чистота, механическая прочность и т.д. При сжигании высокозольного Экибастузского угля процесс связывания  $\text{SO}_2$  активными сорбентами золы существенно усложняется, так как помимо указанных выше характеристик известняка, влияющих на процесс связывания диоксида серы, на этот процесс накладываются следующие факторы: собственно процесс горения угольной частицы с соответствующими изменениями температуры угольной

частицы; изменениями концентрации кислорода на поверхности угольной частицы или внутри частицы в зоне контакта образовавшегося  $\text{SO}_2$  с активными сорбентами золы; характеристики образующегося коксозольного остатка, также определяющих процесс десульфурации. К ним можно отнести: фракционный состав угля и образующейся золы; содержание серы угля; исходная зольность угля; минеральный и фазовый состав золы; абразивные и растрескивающиеся свойства золы; наличие элементов в золе со свойствами катализаторов; мольное отношение  $\text{Ca/S}$  в золе угля; температура слоя; избыток воздуха и т.д.

Исследования по связыванию диоксида серы, проводились стендовой установкой ЦКС созданной в лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев Университета. Технологическая схема установки ЦКС и описание работы приведены в статье «Экспериментальные установки лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев-Университет» опубликованной в данном сборнике тезисов.

Для проведения исследований по сжиганию угля в режиме ЦКС с разреза «Богатырь» были поставлены 4 партии Экибастузского угля зольностью на рабочую массу равным: 37,9%; 45,3%; 61,9% и углистая порода (соответствует характеристикам отходов углеобогащения) складываемая в отвалах зольностью 68,2%. Путем смешивания угля зольностью 37,9% и 61,9% была получена дополнительная партия угля зольностью 47,2%. Смешиванием углистой породы зольностью  $A^p=68,2\%$  и золы, полученной ранее от сжигания этого угля в ЦКС, получена партия угольной породы с  $A^r=79\%$ .

Фракционный состав сжигаемых углей – 0-8 мм. В таблице 1 приведены основные характеристики исследованных углей, необходимые для расчета степени улавливания  $\text{SO}_2$ .

Таблица 1

#### Характеристики исследованных углей

Содержание золы	$A^r$	%	37,91	45,31	47,22	61,87	68,23	78,96
Содержание серы	$S^r$	%	0,63	0,61	0,64	0,55	0,76	0,49
Теоретич. необх. кол-во воздуха	$V^o$ $\alpha=1,0$	нм <sup>3</sup> /кг	5,15	3,99	3,59	2,55	2,09	1,44
Теоретич. объем дымовых газов	$V^o_r$ при $\alpha=1,0$	нм <sup>3</sup> /кг	5,68	2,13	1,98	3,00	2,45	1,72
Калорийность	$Q^p_H$	ккал/кг	4719	3668	3326	2356	1933	1326
Темп-ра горения	Тадиаб	°C	1660	1051	1031	1508	1471	1348
Теоретич. кол-во образовавш. $\text{SO}_2$	$M_{\text{so}2}$	мг/кг	12662	12136	12807	10900	15184	9870
Теоретич. конц.	$C_{\text{so}2}$	мг/ нм <sup>3</sup>	2228	5690	6484	3637	6204	5732

SO <sub>2</sub> при полн. сжигании	$\alpha=1,0$							
Теоретич. конц. SO <sub>2</sub> при полн. сжигании	$C_{SO_2}, \alpha=1,4$	мг/нм <sup>3</sup>	1628	1269	1454	2702	4603	4278
Соотношение Ca/S в угле	Kca/S	-	0,75	1,88	1,57	0,95	5,70	3,05

Анализ имеющихся данных показывает, что процесс десульфурации известняком наиболее полно (наблюдаемый минимум концентрации SO<sub>2</sub> в дымовых газах) происходит при температуре слоя на уровне 840-870°C. Следует отметить, что такие температуры являются рабочими температурами большинства топок с ЦКС, т.к. при этом обеспечивается необходимая эффективность выгорания угля и обеспечивается безшлаковочная работа слоя. Так как, температура реагирующего известняка незначительно отличается от температуры слоя, можно отметить, что оптимальная температура для связывания SO<sub>2</sub> подаваемым известняком составляет 840-870°C. Так как, процесс связывания диоксида серы активными сорбентами золы происходят на поверхности или внутри горячей угольной частицы, то температурный уровень осуществляемого процесса связывания SO<sub>2</sub> существенно отличается от общей температуры слоя. Известно, что температура горячей угольной частицы в слое превышает наблюдаемую температуру слоя от нескольких градусов до нескольких десятков или даже сотен градусов, в зависимости, как от условий горения угольной частицы, так и от типа сжигаемого угля.

Таким образом, при сжигании высокозольного Экибастузского угля оптимальная температура десульфурации, должна существенно отличаться от оптимальной при улавливании SO<sub>2</sub> известняком и изменяться в сторону ее уменьшения.

На рисунке 1 приведены зависимости степени улавливания SO<sub>2</sub> при сжигании Экибастузского угля различной зольности от температуры слоя. Как видно из рисунка, максимальное значение степени улавливания диоксида серы -  $\eta_{SO_2}$  золой угля зольностью 37,9% и 41,7, наблюдается при 750-770°C, для более высокозольных углей ( $A^p=61,8\%$ ) оптимальная температура не столь ярко выражена, а для углистой породы с  $A^p=61,8\%$  оптимум не наблюдается и с уменьшением температуры слоя  $\eta_{SO_2}$  увеличивается. При температуре слоя порядка 800°C степень улавливания SO<sub>2</sub> в зависимости от зольности угля составляет 60-90%. При этом, наибольшая степень улавливания SO<sub>2</sub> наблюдается у углистой породы зольностью 68,2%

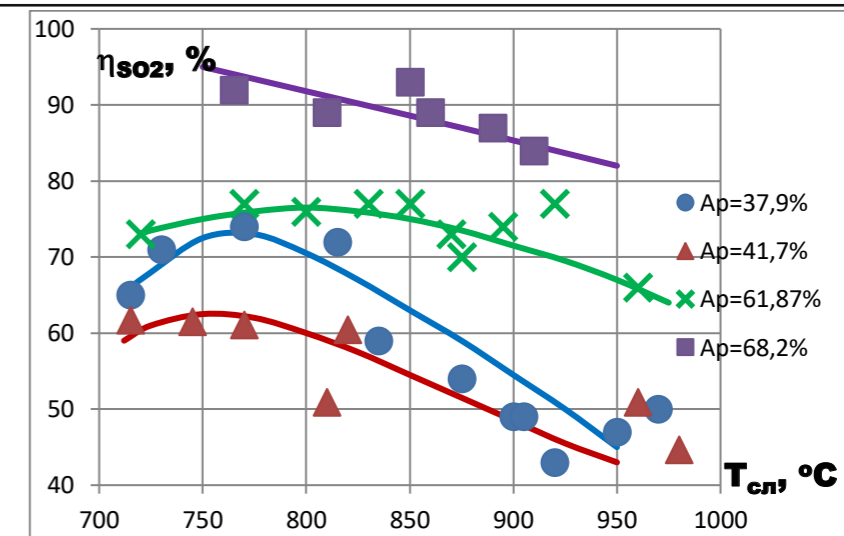


Рис. 1 Зависимость степени улавливания SO<sub>2</sub> золой Экибастузского угля от температуры слоя без добавки известняка

Также были проведены опыты по влиянию подачи известняка в слой при сжигании угля зольностью  $A^p=41,7\%$ . Как видно из рисунка 1 оптимальная температура при сжигании чистого угля с мольным соотношением  $Ca/S=0,88$  составляла 750-770°C, при этом максимальное значение  $\eta_{SO_2}=65\%$ . Подаче этого же угля в смеси с известняком в количестве 5%, при этом  $Ca/S=3,63$ , произошло увеличение  $\eta_{SO_2}$  до 85%, оптимальная температура составила 825-830°C. Увеличение содержания известняка в смеси до 10% с соответствующим увеличением  $Ca/S$  до 6,65 привело к незначительному росту  $\eta_{SO_2}$  – до 87%, при той же оптимальной температуре 825-830°C.

Анализ полученных данных с точки зрения степени использования окиси кальция ( $\eta_{CaO}$ ) показал, что степень использования кальция в исследованном диапазоне температур составляет 45 – 65%. В целом можно отметить, что степень использования активных сорбентов золы с увеличением зольности угля уменьшается, но в тоже время степень улавливания диоксида серы возрастает, что связано со значительным увеличением количества окиси кальция.

Но наблюдаемое явление снижения  $\eta_{CaO}$  с увеличением зольности угля, можно объяснить меньшей разработкой пор, при повышении зольности, т.к. доля возгоняемых и выгораемых компонентов (внутренняя влага, углерод, кислород, водород, азот, сера) уменьшается. При этом доступная поверхность активного сорбента для диффундирующей на нее диоксида серы, уменьшается. Также, с увеличением зольности угля наблюдается упрочнение зольного остатка угольной частицы. Поэтому она менее подвержена разрушению в процессе ее горения, и, следовательно, большая часть активных сорбентов золы находится внутри составляющих зольного остатка. В этом случае, доступ к ним,

образовавшегося при горении  $\text{SO}_2$  резко ухудшается, что вызывает увеличение доли сорбента, не прореагировавшего с диоксидом серы. Но следует отметить, что и в этом случае количество доступного для реагирования  $\text{CaO}$ , достаточно для обеспечения требуемых степеней очистки газов от диоксида серы, даже при температурах, превышающих оптимальную для улавливания серы золой высокосольного угля.

### Литература

1. Рейд. Основные факторы процесса поглощения двуокиси серы известняком и доломитом. Труды американского общества инженеров механиков. Энергетические машины и установки. 1970. т.92, № 1, с.15-22.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ ПРИ СЖИГАНИИ ВЫСОКОСОЛЬНЫХ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ

**Авторы:** Сулейменов К.А., Жакупов Д.М.

**Организация:** Частное учреждение «Nazarbayev University Research and Innovation System», г. Нур-Султан, Казахстан

Анализ развития энергетики Казахстана показывает, что и в обозримой перспективе, уголь по-прежнему будет играть значительную роль в электроэнергетике республики. При этом, как и прежде, ее развитие будет базироваться, большей частью, на дешевых энергетических углях. Но следует отметить, что большинство энергетических углей Казахстана открытой добычи являются низкосортными: многозольные, высоковлажные, высокосернистые, с неблагоприятной минеральной частью. Основным энергетическим углем для электроэнергетики Казахстана является высокосольный Экибастузский уголь. Следует отметить, что угольными тепловыми электростанциями (ТЭС) страны, вырабатывается более 80% всей производимой электроэнергии в Казахстане. При этом доля Экибастузского угля в угольном балансе ТЭС составляет около 90%.

Длительный опыт использования низкосортных углей в традиционной топочной технике (факельные топки с пылеугольным сжиганием), как в странах СНГ, так и в мире показывает, что проблемы эффективного использования такого топлива практически решены, но решение проблем, связанных с обеспечением необходимых экологических характеристик, касающихся снижения выбросов оксидов азота и серы из котлоагрегатов, встречают определенные трудности. Для обеспечения требуемых санитарных норм по эмиссии оксидов азота и серы в атмосферу осуществляются довольно затратные мероприятия. В мире идет постоянный поиск и разработка новых технологий сжигания твердого топлива позволяющих обеспечить не только эффективное сжигание углей, но и обеспечивающие необходимые экологические характеристики.

Одним из перспективных направлений в решении проблем эффективного и экологически чистого процесса сжигания низкосортного угля является их сжигание в топках с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Вопросы перспективности технологии ЦКС были подробно рассмотрены ранее /1/.

Одним из важнейших вредных газовых загрязнителей атмосферы при сжигании угля в котлоагрегатах ТЭС являются оксиды азота –  $\text{NO}_x$ . В целом можно отметить, что в

настоящее время для снижения выбросов NO<sub>x</sub> в традиционных топках с пылеугольным сжиганием используются различные способы и методы, как конструктивного характера, так режимного характера, позволяющие существенно снизить эмиссию оксидов азота из котла. Тем не менее, добиться существующими методами и способами требуемых экологических показателей по выбросам NO<sub>x</sub>, тем более при сжигании низкосортных углей, не удастся. В связи с чем, для обеспечения весьма жестких показателей по выбросам NO<sub>x</sub> в атмосферу устанавливаются дорогостоящие системы азотоочистки.

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные работы по исследованию образования оксидов азота в кипящем слое показали, что этот процесс отличается большой сложностью. Как было установлено /2/, основным источником оксидов азота при сжигании угля в кипящем слое является азот топлива. Установлено, что непосредственно над дутьевой решеткой происходит увеличение концентрации NO<sub>x</sub> до максимального значения и затем концентрация NO<sub>x</sub> постепенно снижается как в слое, так и в надслоевом пространстве. Это связано с одновременным протеканием процессов образования NO<sub>x</sub> и восстановлением до N<sub>2</sub>. Точный механизм окисления азота топлива до сих пор не ясен. Следует отметить, что при нагревании угля наблюдается двухстадийное выделение азотсодержащих соединений: вначале они выходят с так называемыми ранними летучими, а затем, с гораздо большей трудностью – из коксового остатка в виде поздних летучих. В работах /3,4/ сделаны попытки описать механизм образования NO<sub>x</sub> в кипящем слое. В них принимается, что продуктами последовательной трансформации топливного азота в газовой фазе, в основном, являются NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>.

В целом механизм превращения топливного азота представляется следующим образом. По мере прогрева из угля под воздействием высокой температуры выходят летучие вещества, и остается кокс. NO образуется как из азота летучих, так и из азота кокса. С другой стороны, образовавшийся NO восстанавливается до N<sub>2</sub> за счет реакций с азотистыми веществами летучих и окисью углерода (CO), а также за счет гетерогенной реакции NO<sub>x</sub> с коксом /5/.

Как было отмечено ранее, основная часть NO<sub>x</sub> образуется в нижней части камеры и затем по высоте ее происходит снижение NO<sub>x</sub> за счет вышеописанных реакций. Поэтому основным способом снижения NO<sub>x</sub> является двухступенчатое сжигание.

В связи с этим, циркулирующий кипящий слой с организованным двухступенчатым сжиганием, как нельзя лучше подходит для организации твердого топлива с минимально возможной эмиссией оксидов азота. Другим немаловажным фактором технологии ЦКС, влияющим на снижение эмиссии оксидов азота, является наличие циркуляции коксового остатка, заполняющего все топочное пространство и

представляющего собой хороший восстановитель. Таким образом, технология ЦКС обладает качествами, благоприятствующими низкому уровню эмиссии NO<sub>x</sub>.

В настоящем сообщении представлены некоторые результаты исследований по эмиссии оксидов азота при сжигании высокозольного Экибастузского угля на экспериментальной установке ЦКС, созданной в лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев Университета. Технологическая схема установки ЦКС и принцип ее работы приведены в статье «Экспериментальные установки лаборатории «Чистые угольные технологии» Назарбаев-Университет» опубликованной в данном сборнике тезисов.

Для проведения исследований по сжиганию угля в режиме ЦКС с разреза «Богатырь» были поставлены 4 партии Экибастузского угля зольностью на рабочую массу равным: 37,9%; 45,3%; 61,9% и углистая порода (соответствует характеристикам отходов углеобогащения) складированная в отвалах зольностью 68,2%. Путем смешивания угля зольностью 37,9% и 61,9% была получена дополнительная партия угля зольностью 47,2%. Смешиванием углистой породы зольностью A<sup>p</sup>=68,2% и золы, полученной ранее от сжигания этого угля в ЦКС, получена партия угольной породы с A<sup>r</sup>=79%.

Для адекватного сравнения полученных значений концентрации NO<sub>x</sub>, используются приведенные к избытку воздуха α=1,4 значения концентраций NO<sub>x</sub>.

Перевод измеренной концентрации NO<sub>x</sub> к приведенному значению концентрации NO<sub>x</sub> при α=1,4 осуществим по следующей формуле:

$$C_{NO_x, \alpha=1,4}^{прив} = C_{NO_x, мг/м^3}^{изм} \cdot \frac{V_r^0 + (\alpha - 1) \cdot V_b^0}{V_r^0 + (1,4 - 1) \cdot V_b^0} \quad (1)$$

где: α – избыток воздуха;

V<sub>b</sub><sup>0</sup> – теоретическое количество воздуха, нм<sup>3</sup>/кг;

V<sub>r</sub><sup>0</sup> – теоретическое количество газа, нм<sup>3</sup>/кг.

Фракционный состав сжигаемых углей – 0-8 мм. В таблице 1 приведены основные характеристики исследованных углей, необходимые для расчета эмиссии NO<sub>x</sub>.

Таблица 1

#### Характеристики исследованных углей

Содержан. золы	A <sup>r</sup>	%	37,91	45,31	47,22	61,87	68,23	78,96
Содержан. азота	N <sup>r</sup>	%	0,84	1,44	1,26	0,47	0,49	0,32
Теоретич. необх. кол-во воздуха	V <sup>0</sup> α=1,0	нм <sup>3</sup> /кг	5,15	3,99	3,59	2,55	2,09	1,44

Теоретич. объем дымовых газов	$V^o_{\Gamma}$ при $\alpha=1,0$	нм <sup>3</sup> /кг	5,68	2,13	1,98	3,00	2,45	1,72
Калорийность	$Q^p_n$	ккал/кг	4719	3668	3326	2356	1933	1326
Темп-ра горения	$T_{адиаб}$	°С	1660	1051	1031	1508	1471	1348
Теоретич. кол-во NO (100% переход N <sup>r</sup> в NO)	$M_{NO}$ при $\alpha=1,0$	мг/кг	18064	30908	26949	10108	10398	6759
Теоретич. концентрац. NO	$C_{NO}$ при $\alpha=1,0$	мг/нм <sup>3</sup>	3179	194921	304844	3373	4249	3926
Теоретич. концентрац. NO	$C_{NO}$ при $\alpha=1,4$	мг/нм <sup>3</sup>	2323	3231	3060	2506	3152	2930
Теоретич. концентац. NOx при пересчете в NO2	$C_{NOx}$ при $\alpha=1,4$	мг/нм <sup>3</sup>	1705	1849	1772	1870	2349	2195

Из приведенных выше теоретических положений и результатов экспериментальных исследований следует, что уровень выбросов NO зависит от таких характеристик угля, как доля азотсодержащих соединений, вышедшей с «ранними» летучими, реакционных свойств коксового остатка, содержания летучих и азота в топливе, гранулометрического состава угля. Также, эмиссия NO<sub>x</sub> зависит и от конструктивных особенностей топочной камеры, от режимных параметров топочного процесса, таких как температура слоя, избыток воздуха, соотношение первичного и вторичного воздуха, скорости газа в топке и многих других факторов.

На рис. 1 представлена зависимость приведенных значений оксидов азота – NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> от избытка воздуха для Экибастузского угля различной зольности: A<sup>p</sup>=37,9%; A<sup>p</sup>=41,7%; A<sup>p</sup>=61,87% и A<sup>p</sup>=68,2%. Как видно из этого рисунка, с увеличением избытка воздуха до  $\alpha_{ст}=1,25-1,3$  наблюдается интенсивный рост оксидов азота для всех углей от 30 мг/нм<sup>3</sup> при  $\alpha=1,02$  до 170-300 мг/нм<sup>3</sup>  $\alpha=1,3$  для всего диапазона исследуемых углей. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  не оказывает заметного влияния на увеличении концентрации NO<sub>x</sub>, но наблюдается незначительный и монотонный рост эмиссии оксидов азота также для всех углей.

Из рисунка также видно, что увеличение зольности угля приводит к снижению эмиссии NO<sub>x</sub>, при прочих равных условиях. Так для угля зольностью 37,9% средняя концентрация NO<sub>x</sub> составила 270-300 мг/нм<sup>3</sup>, для углистой породы зольностью 68,2% - эта величина составила 170-220 мг/нм<sup>3</sup>, что связано с меньшим содержанием азота топлива в более зольном угле.

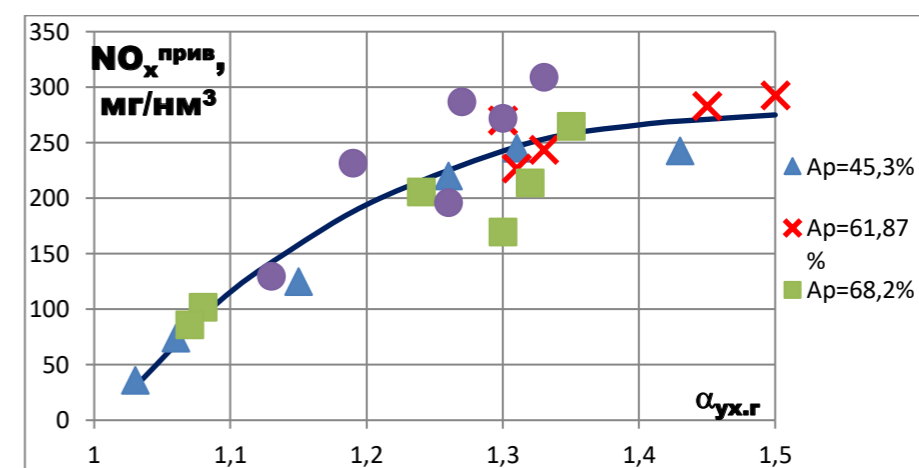


Рис. 1 Зависимость приведенной концентрации оксидов азота от избытка воздуха для Экибастузского угля различной зольности

На рис. 2 представлена зависимость эмиссии оксидов азота при сжигании Экибастузского угля различной зольности (A<sup>p</sup>=37,9%; 41,7%; 61,87%; 68,2% и 79%) в циркулирующем кипящем слое от температуры слоя. Как видно увеличение T<sub>сл</sub> ведет к росту концентрации NO<sub>x</sub><sup>прив</sup>. При этом, при какой-то определенной температуре слоя, диапазон изменения NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> для всех углей весьма значителен. Так, при рабочей температуре слоя 875°С, диапазон изменения концентрация NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> для всех углей составляет 220 – 290 мг/нм<sup>3</sup>, при этом для малозольного угля зольностью 37,9% концентрация NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> составила в среднем 280 мг/нм<sup>3</sup>, для угля с A<sup>p</sup>=68,2% среднее значение NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> составило ориентировочно 250 мг/нм<sup>3</sup>. Увеличение температуры слоя до T<sub>сл</sub>= 950°С, привело к соответствующему увеличению приведенной эмиссии NO<sub>x</sub><sup>прив</sup> до 260 – 320 мг/нм<sup>3</sup>.

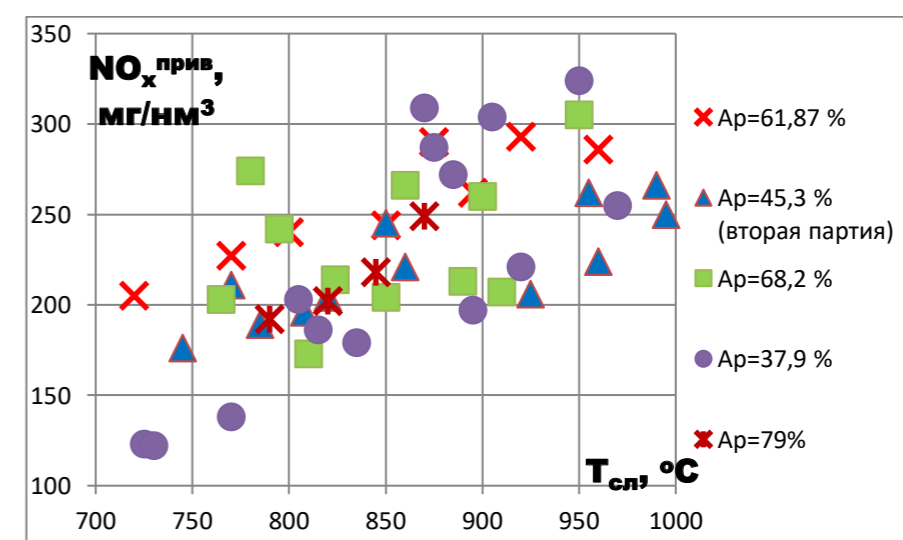


Рис. 2 Зависимость эмиссии оксидов азота от температуры слоя при сжигании угля различной зольности в ЦКС

Исследования по влиянию доли первичного воздуха -  $a_{сл}$  показало, что для всех исследованных углей увеличение значения  $a_{сл}$  ведет к росту эмиссии оксидов азота. Так, увеличение величины  $a_{сл}$  со значения равного 0,55 до 0,8, привело к росту концентрации  $NO_x^{прив}$  для угля зольностью с 200 мг/нм<sup>3</sup> до 280 мг/нм<sup>3</sup>, для угля зольностью 68,2%, соответственно, с 200 мг/нм<sup>3</sup> до 270 мг/нм<sup>3</sup>.

### Литература

1. Сулейменов К.А. Перспективы развития технологии кипящего слоя в топочной технике для сжигания углей Казахстана – Энергетики и топливные ресурсы Казахстана, 1994, № 3, с.49-54.
2. Фурасава Т., Хонда Т., Такано Дж., Кунии Д. Снижение содержания окиси азота в экспериментальной камере для сжигания угля в псевдооживленном слое. – В кн.: Новое в практике псевдооживления. М.: Мир, 1980, с.78-89.
3. Beer, Sarofim and Lee. NO formation and reduction in fluidized bed combustion of coal. Journal of the Institute of Energy. v.54, N 418, 1981, p. 38-47.
4. Gibbs B.M. A simplified model for NO formation from fuel – nitrogen in fluidized bed combustion/ - In. Institute of Energy. London Symposium Series. 1980, N 4, p. v.-4-1 – v-4-12
5. Перейра Ф.Д., Бэр Д.М. Математическая модель образования и деструкции  $NO_2$  при сжигании угля в псевдооживленном слое. М., 1980, с. 66-77.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ЛАБОРАТОРИИ «ЧИСТЫЕ УГОЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» НАЗАРБАЕВ УНИВЕРСИТЕТ

**Авторы:** Сулейменов К.А., Каспиев А.Г., Исмаилов А.Д.

**Организация:** Частное учреждение «Nazarbayev University Research and Innovation System», г. Нур-Султан, Казахстан

Наличие весьма значительных запасов угля на территории Казахстана способствовало приоритетному развитию угольной энергетики. Основным энергетическим углем для тепловых электростанций (ТЭС) страны является высокзолый Экибастузский уголь, доля которых в угольном балансе ТЭС составляет около 90%. При этом, все угольные ТЭС оснащены котлами с пылеугольным факельным сжиганием. Следует также отметить, что Экибастузский уголь является низкосортным углем.

При сжигании низкосортных углей в традиционных котлах и с пылеугольным сжиганием, наблюдается ряд проблем связанных с вопросами эффективного сжигания такого топлива и необходимостью соблюдения экологических характеристик, касающихся снижения выбросов летучей золы, оксидов азота и серы из котлоагрегата в атмосферу. В связи с этим в мире идет постоянный поиск и разработка новых технологий сжигания твердого топлива позволяющих обеспечить не только эффективное сжигание углей, но и обеспечивающие необходимые экологические характеристики.

Одним из перспективных направлений в решении проблем эффективного и экологически чистого процесса сжигания низкосортного угля является их сжигание в топках с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС).

Для исследования возможности сжигания низкосортных углей, а также получения необходимых экспериментальных данных для проектирования и внедрения котлов с ЦКС в Казахстане в АОО «Назарбаев Университет» создана лаборатория «Чистые угольные технологии». В лаборатории созданы следующие экспериментальные установки для исследования процесса пиролиза, газификации и сжигания твердого топлива:

1. Стендовая установка для исследования пиролиза и газификации угля в пузырьковом кипящем слое (ПКС) и циркулирующем кипящем слое (ЦКС) – УГ-ЦКС;
2. Стендовая установка для исследования сжигания угля в ПКС и ЦКС – КУ-КС-ЦКС;

3. Стендовая установка предтопок-газификатор со сверхадиабатическим горением – ПГСАГ;
4. Изотермическая установка для исследования гидродинамики топочного контура ЦКС – ИУ-ЦКС.

В течение последних двух лет были проведены исследования: по получению мелкодисперсного полукокса Шубаркульского угля в режиме термоокислительного пиролиза (исследования закончены – положительно) и по сжиганию высокозольного Экибастузского угля и отходов его обогащения (зольность исследованного угля 37-79%) в ПКС и ЦКС. Получены данные по эффективности горения, по эмиссии оксидов азота и серы в диапазоне температур кипящего слоя 750-1000оС. Показана возможность и эффективность сжигания отходов зольностью до 80% в кипящем слое.

Для обеспечения работы экспериментальных установок в лаборатории имеются следующие общецеховые системы:

1. Система контроля, измерения и регулирования основных параметров и режимов экспериментальных установок.
2. Система подачи воздуха и отвода дымового газа в составе 3-х высоконапорных воздуходувок, расходомерных устройств, компрессоров, дымососов, воздухопроводов и газоходов.
3. Система аспирации помещения лаборатории (3 системы).
4. Система приготовления угля (установлена в отдельном помещении -контейнере) в составе щековой дробилки, рассеивочного узла, сушилки угля с электровоздухоподогревателем, системы аспирации помещения.
5. Система обратного водоснабжения в составе вентиляторной градирни, напорной станции подачи охлаждающей воды на установки, промежуточного накопительного бака.
6. Система хранения, подачи и измерения кислорода в составе кислородной рампы на шесть баллонов, расходомера кислорода, кислородопроводов, запорной и регулирующей арматуры.
7. Система приготовления и подачи пара в составе парового электрического котла производительностью до 50 кг/час с измерительным блоком, расходомера пара, пароперегревателей первой и второй ступеней, паропроводов, запорной и регулирующей арматуры.

#### 1. Стендовая установка газификатор-пиролизер - УГ-ЦКС

На рис. 1 представлена принципиальная технологическая схема Стендовая установка газификатор-пиролизер - УГ-ЦКС

Установка предназначена для исследования термоокислительного пиролиза и газификации угля в режиме ПКС и ЦКС. Расход угля до 70 кг/час, фракционный состав 0-25 мм (в зависимости от типа угля и поставленной задачи). Основные узлы образующие топочный контур ЦКС: топка-реактор 1 (изготовлена из жаропрочной стальной трубы внутренним диаметром 150 мм и высотой 5,6 м), технологический циклон 2, стояк 21, пневмомеханический затвор 3.

Уголь из бункера 4 шнековым питателем 5 по топливопроводам 15 пневмотранспортом направляется в топку 1. Воздух в топку и другие узлы установки подается воздуходувкой 22. При этом первичный и вторичный воздух подогревается в электровоздухоподогревателях 13 до требуемой по режиму температуры. Воздух на пневмотранспорт, пневмомеханический затвор 3, на камеру сгорания 8 подается без подогрева. При этом, подогрев первичного воздуха в электровоздухоподогревателе при растопке установки предусмотрен до 700-750оС. В рабочем режиме подогрев первичного и вторичного воздуха может регулироваться от 50 до 300оС. Рабочие температуры в слое (ПКС или ЦКС) составляют 600-1100оС (в зависимости от типа угля и поставленной задачи).

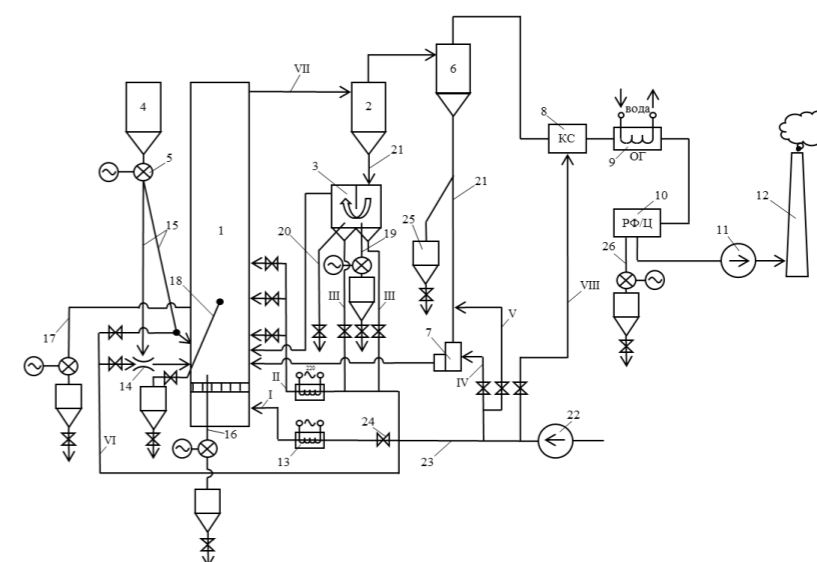


Рис. 1 Технологическая схема стендовой установки газификатора УГ-ЦКС

Крупные частицы коксозольного остатка (полукокс), образующиеся при пиролизе или газификации угля, выводятся (при необходимости) из топки водоохлаждаемыми шнеками-дозаторами 16 и 17 с регулируемой производительностью в накопительные бункера. Образующиеся в топке 1 генераторные газы и мелкие частицы

недогоревшего угля и золы выносятся из топки газовым потоком и поступают в технологический циклон 2, где происходит отделение большей части твердой фазы от газового потока. Выделившийся коксозольный остаток по стояку 21 поступает в пневмомеханический затвор 3, состоящий из двух камер кипящего слоя: приемной и передающей. Коксозольный остаток из стояка и приемной камеры затвора 3 поступает в передающую камеру затвора 3 и далее перепускается в топку 1, образуя, таким образом, циркуляционный поток твердой фазы по топочному контуру. Из приемной камеры затвора готовый полукокс, водоохлаждаемым шнеком-дозатором 19 выводится (при необходимости) в бункер накопитель.

Неуловленные в технологическом циклоне 2 мелкие частицы коксозольного остатка поступают в санитарный циклон 6 и далее выводятся в бункер 25. Из санитарного циклона 6 генераторные газы по неохлаждаемому газоходу поступают в камеру сгорания 8, куда по системе воздухопроводов подается воздух. После камеры сгорания дымовые газы поступают в трубчатый газо-водяной охладитель газа 9 для снижения температуры дымовых газов до уровня, требуемой по условиям работы дымососа. После охладителя газов 9, дымовые газы поступают во второй санитарный циклон 10 (байпас рукавного фильтра) для обеспечения необходимой по санитарным нормам очистки газов. После окончательной очистки, дымовые газы дымососом 11 отводятся в дымовую трубу 12 и сбрасываются в атмосферу.

На установке УГ-ЦКС были проведены исследования по разработанной и запатентованной технологии получения мелкодисперсного полукокса Шубаркульского угля и генераторного газа в режиме термоокислительного пиролиза. Была отработана технология частичной воздушной газификации и термоокислительного пиролиза малозольного Шубаркульского угля, получены данные по влиянию режимных и конструктивных параметров на качество получаемого полукокса и образующегося генераторного газа.

Для продолжения работ по исследованию воздушной, паровоздушной и парокислородной газификации твердого топлива, отходов углеобогащения и ТБО установка УГ-ЦКС также оснащена системами подготовки и подачи в установку высокотемпературного пара и кислорода.

## 2. Комбинированная стендовая установка (КУ-КС-ЦКС)

Установка предназначена для исследования сжигания угля в режиме ПКС и ЦКС. Расход угля, углеотходов до 100 кг/час, фракционный состав 0-25 мм (в зависимости от

типа сжигаемого топлива, зольности и поставленной задачи). Топка изготовлена из жаропрочной стальной трубы внутренним диаметром 220 мм и высотой 5,75 м.

На рис. 2 представлена принципиальная технологическая схема установки КУ-КС-ЦКС. В целом технологическая схема КУ-КС-ЦКС подобна схеме УГ-ЦКС. Основное отличие заключается в наличии двух технологических циклонов 10 и 19 включенных последовательно, в также двух систем рециркуляции состоящих из двух стояков 11 и двух пневмомеханических затворов 12. Для регулирования температуры слоя без изменения форсировки слоя (расхода угля), в средней и верхней части корпуса топки 1 установлены водоохлаждаемые кольцевые сегменты 2, имитирующие внутритопочные настенные вертикальные поверхности нагрева котла с топкой ЦКС, а также предусмотрены выдвижные поверхности охлаждения слоя 3. Принцип действия КУ-КС-ЦКС аналогичны работе УГ-ЦКС. Отличие только в завершенности процесса горения угля в топке. В установке КУ-КС-ЦКС осуществляется режим полного сжигания с избытком воздуха более 1.

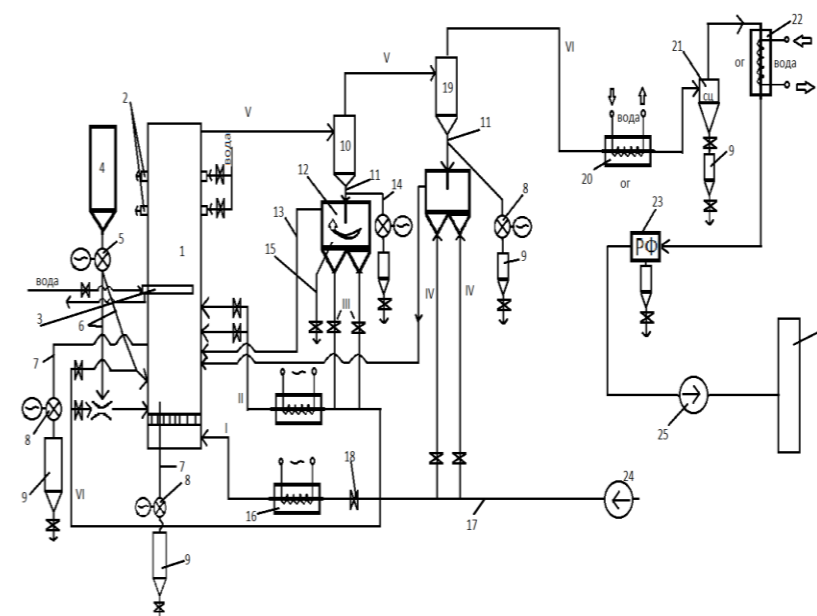


Рис. 2 Технологическая схема комбинированной установки КУ-КС-ЦКС

На установке КУ-КС-ЦКС были проведены опыты по сжиганию нескольких партий высокозольного Экибастузского угля и отходов его обогащения, фракционным составом 0-8 мм, зольностью от 37% до 79% в режиме ПКС и ЦКС. Получены данные по эффективности горения, по теплообмену между слоем и внутритопочными поверхностями нагрева, по эмиссии оксидов азота и серы в диапазоне температур кипящего слоя 750-1000оС. Показана

### 3. Предтопок-газификатор сверхадиабатического горения (ПГСАГ)

Установка предтопок-газификатор сверхадиабатического горения -ПГСАГ предназначена для исследования горения или газификации высокозольных углей и отходов углеобогащения, ТБО и других углеродсодержащих материалов, которые невозможно сжечь или газифицировать используя традиционные технологии – слоевое или факельное сжигание.

На рис. 3 представлена принципиальная технологическая схема ПГСАГ. Отходы углеобогащения фракционным составом 5-20 мм из бункера 1 под действием собственного веса по топливоподающей трубе 2 подается в топку 4, где под воздействием высоких температур происходит его газификация и горение в слоевом режиме. Рабочая высота слоя горящего угля определяется расстояние конца топливоподающей трубы 2 от воздухораспределительного устройства 5. При этом данная величина может регулироваться. В топку через воздухораспределительную решетку по системе воздухопроводов 9 подается холодный воздух. Для предотвращения достижения температуры в топке выше температуры плавления золы угля (ориентировочно 1100-1150оС) в топку совместно с воздухом из парового котла 11 по системе паропроводов 12 подается необходимое количество пара с температурой 200-250оС.

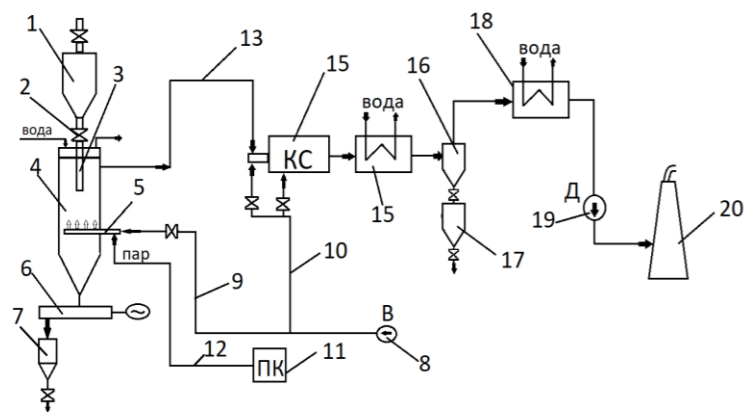


Рис. 6 Принципиальная технологическая схема ПГСАГ

Продукты газификации с температурой 400-600оС из топки по газопроводу 13 поступают в камеру сгорания генераторных газов 15, куда также подается воздух по воздухопроводам 10. Камера сгорания предназначена для предотвращения попадания в атмосферу генераторных газов содержащих  $H_2$  и  $CO$ . Из камеры сгорания высокотемпературный газовый поток поступает в два последовательно расположенных газо-водяных охладителя газов 15 и 18, где охлаждаются до температуры, не

превышающей рабочую температуру дымососа. Между охладителями газов 15 и 18 расположен санитарный циклон 16, уловленная зола удаляется в бункер 17. Очищенные дымовые газы дымососом 19 сбрасываются в дымовую трубу 20.

Исследования по сжиганию высокозольных отходов углеобогащения Экибастузского угля начаты в 2020 г.

Лаборатория «Чистые угольные технологии» Назарбаев Университета приглашает к сотрудничеству научно-исследовательские, научно-производственные, производственные организации в проведении исследований на существующих и вновь создаваемых экспериментальных установках.