

Сборник докладов расширенного НТС АО «Свердловэнерго».

Доклад:

Делягин Г.Н. ЭКОВУТ – новое экологически чистое топливо XXI века.

Альтернатива традиционному органическому топливу.

Сборник докладов расширенного НТС АО "Свердловэнерго"

06 июня – 08 июня 2000 г. Екатеринбург 2000 г с.102 – 119.

Екатеринбург 2000 г
06 июня – 08 июня 2000 г.

ЭКОВУТ – новое экологически чистое топливо XXI века. Альтернатива традиционному органическому топливу.

Основные закономерности процесса горения топлива ЭКОВУТ

Топливо ЭКОВУТ это искусственное композиционное топливо, создаваемое на основе угля и воды, со свойствами задаваемыми для конкретного топливопотребляющего объекта.

Топливо ЭКОВУТ это единая тонкодисперсная система коллоидного типа, в которой отдельные ее компоненты находятся в тесном соприкосновении и активно вступают в химические реакции между собой при определенных условиях. Все составляющие твердой и жидкой фаз этого топлива активно участвуют в химических реакциях на всех стадиях процесса горения.

Топливо ЭКОВУТ может быть применено взамен угля, мазута и природного газа в эксплуатируемых котлах без их существенной реконструкции.

Для сжигания топливо ЭКОВУТ необходимо распылить форсункой в потоке горячего дутьевого воздуха.

При распыливании топлива ЭКОВУТ образуется полидисперсный поток капель с максимальным размером 250-300 мкм и минимальным 20-25 мкм. Средний массовый размер капель распыленного топлива ЭКОВУТ составляет 170-200 мкм, то есть основная масса капель распыленного топлива ЭКОВУТ имеет крупные размеры.

Сферическая капля топлива ЭКОВУТ содержит в своем объеме до нескольких десятков и сотен тысяч частиц твердой фазы.

При рабочей влажности топлива $W^r=35\%$ в капле топлива ЭКОВУТ размером 150-200 мкм содержится от 10 до 25 тысяч частиц твердой фазы, что позволяет считать топливо в капле однородной системой.

Выгорая капли топлива ЭКОВУТ образуют полые высокопористые зольные агломераты тех же размеров. Зольные агломераты вначале формируются за счет адгезии частиц твердой фазы, а затем закрепляются в результате спекания частиц при прохождении сквозь них зоны горения в капле.

Внутри зольных агломератов в результате фиксации наружного размера агломерата на начальных стадиях горения капли и направленного движения частиц твердой фазы в капле от центра к периферии в процессе испарения жидкой фазы, образуется сферическая полость.

Одной из отличительных особенностей горения топлива ЭКОВУТ в потоке дутьевого воздуха является параллельное протекание процессов испарения жидкой фазы из объема капель и горения органической массы топлива на их агломерированной поверхности.

Эксперименты показали, что водяной пар, пронизывая высохший слой частиц капли топлива ЭКОВУТ, активизирует их поверхность, снижая энергетический барьер экзотермических реакций (горения) на поверхности угольных частиц. Результатом этих процессов является снижение температуры воспламенения частиц угля и слабая зависимость этой температуры от выхода летучих (рисунок 1).

Одновременно снижается скорость деструкции массы угольного вещества, а следовательно и скорость выделения летучих веществ, предотвращается процесс образования вторичных углеводородов.

При введении капли топлива ЭКОВУТ в высокотемпературную окислительную среду в ее объеме возникает целый комплекс процессов.

Особенности термохимической подготовки поверхности капли топлива ЭКОВУТ и ее воспламенения существенно меняют характер протекания процесса выгорания частиц угля в капле.

Эксперименты посвященные исследованию динамики выгорания капель топлива ЭКОВУТ позволили установить ряд особенностей этого процесса. Из полученных зависимостей изменения во времени температуры поверхности капель топлива ЭКОВУТ и их массы, при $W^f=40-60\%$, можно выделить 11 характерных стадий процесса, каждая из которых протекает по отличному от других закону (рисунок 2).

Во время стадии А происходит прогрев поверхности капли топлива ЭКОВУТ до температуры испарения жидкой фазы, практически без изменения массы капли.

На стадии Б происходит поверхностное испарение жидкой фазы при постоянной температуре капли. Процесс испарения жидкой фазы из объема капли топлива ЭКОВУТ является достаточно продолжительным и к моменту воспламенения капли зона испарения продвигается в ее глубину не более, чем на 15-20 %, причем чем больше влажность топлива, тем это продвижение меньше.

На стадии 1 поверхность испарения постепенно проникает вглубь капли, поверхностный, структурированный слой высохших частиц угля активируется водяным паром и начинаются экзотермические реакции (горение) внутри этого слоя. Падение массы и рост температуры капли протекают линейно, причем скорость подъема температуры близка к максимальной по сравнению с другими стадиями. Эта стадия определяет эффективность всего процесса выгорания капли топлива ЭКОВУТ. В конце этой стадии начинается выделение летучих горючих.

На стадии 2 скорость подъема температуры снижается из-за влияния эндотермических процессов деструкции угольного вещества, приводящей к выделению летучих.

Стадия 3 начинается с видимого воспламенения летучих, выгорание которых на этой стадии составляет 7-10 % от начальной массы капли.

Стадия 4 характеризуется началом горения углеродной части топлива, это зона максимальных скоростей роста температуры. Далее интенсивность горения летучих снижается и скорость нарастания температуры также начинает снижаться.

Стадия 5 – стадия развитого гетерогенного (неоднородных веществ) горения углеродной части топлива и летучих при их догорании над поверхностью капли. В конце этой стадии наблюдается максимальная температура поверхности горящего слоя частиц капли.

На стадии 6 выделяющиеся летучие горят в слое высохших частиц твердой фазы топлива ЭКОВУТ, зона горения уходит внутрь слоя высохших частиц и температура на поверхности капли начинает снижаться.

К началу стадии 7 горение летучих в слое высохших частиц прекращается, при высоких температурах среды это самая протяженная стадия горения коксового остатка характеризующаяся практически линейным снижением температуры во времени.

Стадия 8 - догорания коксового остатка, протекает при круто падающей температуре; она переходит в стадию 9 охлаждения образовавшегося полого высокопористого зольного агломерата.

Характерно, что начиная с воспламенения летучих, стадия 3, скорость процесса уменьшения массы капли топлива ЭКОВУТ постоянно снижается независимо от изменения температуры поверхности капли.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что процесс горения капли топлива ЭКОВУТ начинается до воспламенения летучих, с гетерогенных реакций (между неоднородными веществами) в активированном слое угольных частиц капли, приводящих к быстрому росту температуры.

Водяной пар активно участвует в реакциях с углеродом топлива в качестве промежуточного окислителя. Это способствует высокой полноте выгорания топлива ЭКОВУТ, достигающей 99,5-99,8 %.

Достаточно крупные размеры капель топлива ЭКОВУТ в потоке дутьевого воздуха определяют диффузионный характер горения на всем протяжении процесса. Это допускает возможность вести процесс горения топлива ЭКОВУТ с избытком воздуха не более 3-5 %.

Как показывают эксперименты к началу воспламенения капли топлива ЭКОВУТ из ее объема испаряется менее 50 % первоначально заключенной в ней жидкой фазы, что делает существенными реакции водяного пара с углем, протекающие с образованием водорода и монооксида углерода (рисунок 6).

Эти продукты реакции, равномерно распределяясь вблизи поверхности капли в условиях высокой концентрации водяного пара, взаимодействуя с кислородом воздуха, полностью догорают, образуя голубой светящийся ореол вокруг капли. Таким образом гетерогенное реагирование на поверхности капли происходит в условиях восстановительной или полувосстановительной, при диффузии туда кислорода, среды.

Зависимости (рисунок 3) относительной длины зоны горения топлива ЭКОВУТ полученные в стендовых условиях, при теплотехнических испытаниях парового котла ДКВр-6,5-13 котельной шахты «Лутугинская-Северная» комбината Луганск-уголь при работе на топливе ЭКОВУТ из угля марки Г с зольностью $A^d=17-27$ % и влажностью $W^f=50-60$ %, а также теплотехнических испытаниях парового котла ЛМЗ (14,5 т п./ч, $t_n=360$ °С, $P_n=1,5$ МПа) Анжерской ЦЭС при работе на топливе ЭКОВУТ из угля марки ОС (отощенный спекающийся) с зольностью $A^d=14$ % и влажностью $W^f=43-54$ %, показывают:

- что, в отличие от горения пылевидного топлива, протяженность зоны горения топлива ЭКОВУТ слабо зависит от расхода топлива $G_{то}$, при пересчете на сухое беззольное состояние, и его зольности A^d ;

- протяженность зоны горения топлива ЭКОВУТ резко сокращается с повышением концентрации кислорода в воздухе C_o (приведенной к атмосферному давлению) и давления в зоне горения P ;

- повышение влажности топлива ЭКОВУТ W^f уменьшает длину зоны горения, в связи с увеличением поверхности реагирования потока капель топлива;

- увеличение же начального среднеповерхностного размера $d_{ко}$ капли топлива ЭКОВУТ существенно увеличивает длину зоны горения;

- увеличение избытка дутьевого воздуха, как и при сжигании любого органического топлива в диффузионном режиме, сначала приводит к определенному сокращению протяженности зоны горения, а затем вновь к ее возрастанию.

Экспериментальные данные выявили две ярко выраженные зоны горения топлива ЭКОВУТ (рисунок 4): зону активного горения, со степенью выгорания 70-75 %, и стремительно растущей температурой процесса, и зону догорания топлива, когда температура процесса плавно снижается.

Для устойчивого и эффективного протекания процесса горения топлива ЭКОВУТ очень важно соблюдение начальных тепловых параметров.

Если температура в начальном сечении реакционного объема недостаточно высока, процессы тепло-массопереноса в каплях топлива ЭКОВУТ будут протекать менее интенсивно и капли могут значительно подсохнуть до воспламенения. В результате образуется либо крупный сухой агломерат, если температура плавления золы невысока, либо частицы твердой фазы рассыпятся за счет пульсаций в турбулентном потоке. В обоих случаях горение будет протекать вяло и неустойчиво с большой механической неполнотой сгорания.

Так при сжигании топлива ЭКОВУТ в паровом котле ДКВр-6,5-13 (рисунок 5), снижение температуры в начальном сечении реакционного объема ниже 800 °С приводило к удалению начала воспламенения топлива на 500-800 мм, в результате чего капли топлива подсыхали до воспламенения, процесс затягивался и суммарная степень выгорания топлива падала до 70 %. В то время как при обеспечении температуры в начальном сечении реакционного объема 900-1000 °С капли топлива ЭКОВУТ воспламенялись практически на срезе форсунки а суммарная степень выгорания топлива достигала более 99 %.

Организация сжигания топлива ЭКОВУТ в котле

По физико-механическим характеристикам топливо ЭКОВУТ аналогично жидкому топливу, поэтому технологии его транспортировки, хранения и ввода в топку котла также аналогичны (схема 1).

Схема подачи топлива ЭКОВУТ в форсунки котла включает в себя:

- резервуар для хранения запаса топлива ЭКОВУТ;
- насос подачи топлива ЭКОВУТ в форсунки и на рециркуляцию в резервуар для хранения запаса топлива;
- сетчатый фильтр;
- трубчатый подогреватель.

Достаточный уровень теплонапряжения в зоне воспламенения топлива ЭКОВУТ, достигается определенной организацией структуры воздушных и газовых потоков в топочном объеме с интенсивным подсосом горячих продуктов сгорания горящего факела в зону воспламенения топлива, а также повышением энергетического потенциала вводимых в топку топлива ЭКОВУТ и дутьевого воздуха, путем их предварительного подогрева.

Основным фактором обеспечивающим необходимые тепловые условия для воспламенения топлива ЭКОВУТ у среза форсунки и аэродинамическую стабильность факела, является рециркуляция горячих продуктов сгорания к корню факела, вызываемая эжектирующим действием вихревого потока продуктов сгорания.

На основании результатов многочисленных экспериментов проведенных на полигоне ГУП НПО «Гидротрубопровод» была разработана струйная паро- пневмомеханическая водоохлаждаемая форсунка топлива ЭКОВУТ (схема 2), состоящая из трех каналов, образующих концентрически расположенными стандартными трубами, и наконечника с заменяемым соплом из износостойкого материала.

Топливо ЭКОВУТ проходит по осевой трубе форсунки, установленной в канале охлаждающей воды, по внешней трубе подается распыливающий агент, насыщенный пар или сжатый воздух.

Водяное охлаждение канала топлива ЭКОВУТ предусмотрено для предотвращения высыхания топлива ЭКОВУТ при случайных перебоях в его подаче.

Распыливание топлива ЭКОВУТ, в данной форсунке, производится в три стадии. В первой фазе при истечении из канала сопла форсунки со скоростью 8 – 10 м/сек, струя топлива ЭКОВУТ приходит в неустойчивое состояние. Затем она оказывается в зоне смешения с распыливающим агентом, истекающим из двенадцати каналов диаметром 2 мм каждый со скоростью на срезе каналов около 100 м/сек. Шесть каналов распыливающего агента расположены под углом 90° к струе топлива ЭКОВУТ, шесть каналов распыливающего агента расположены под углом 45°. Этим создается равномерный спектр распределения мелкодисперсных (в пределах 200-400 мкм) капель топлива ЭКОВУТ в потоке первичного дутьевого воздуха. В третьей фазе капли топлива ЭКОВУТ, попадая в турбулентный поток первичного дутьевого воздуха, доизмельчаются до размера 150-300 мкм и приобретают скорость и направление, определяемые параметрами первичного дутьевого воздуха.

Способ смешения топлива ЭКОВУТ с распыливающим агентом вне пределов форсунки, разработан в ГУП НПО «Гидротрубопровод» для уменьшения абразивного износа канала сопла.

Крутка дутьевого воздуха обеспечивает необходимые тепловые условия для воспламенения топлива ЭКОВУТ у среза форсунки и аэродинамическую стабильность факела, улучшает процесс смесеобразования дутьевого воздуха с топливом и условия обтекания потоком дутьевого воздуха капель топлива, движущихся поступательно после форсунки.

Опираясь на опыт накопленный на полигоне ГУП НПО «Гидротрубопровод» разработана направленно вихревая (турбулентная) горелка с тангенциальным подводом дутьевого воздуха (схема 3).

Горелка вихревая состоит из трех каналов, образуемых концентрически расположенными: стандартной трубой, в которой устанавливается форсунка топлива ЭКОВУТ, и цилиндрическими корпусами первичного и вторичного дутьевого воздуха.

Основной поток дутьевого воздуха, составляющий от 70 до 100% всего расхода дутьевого воздуха, направленно подается по каналу первичного воздуха в корень факела с выходной скоростью 70-100 м/с.

Вторичный дутьевой воздух, составляющий до 30% всего расхода дутьевого воздуха, направленно подается по периферийному каналу вторичного воздуха с выходной скоростью до 40 м/с. Относительно небольшая доля вторичного дутьевого воздуха объясняется тем, что его подача к корню факела может растягивать зону воспламенения топлива ЭКОВУТ.

Угол раскрытия факела при применении горелки такой конструкции не превышает 30°.

Горелочными узлами такой конструкции могут, например, дооборудоваться слоевые котлы для их перевода на камерное сжигание топлива ЭКОВУТ.

Такие же струйные паро- пневмомеханические форсунки топлива ЭКОВУТ могут устанавливаться в вихревых горелках котлов большой паропроизводительности.

В настоящее время в ГУП НПО «Гидротрубопровод» разрабатывается форсунка топлива ЭКОВУТ большой производительности, с организацией осевой рециркуляции горячих продуктов сгорания к корню факела. Форсунка топлива ЭКОВУТ такой конструкции сможет быть применена в прямоточных горелках котлов.

Перевод котлов на сжигание топлива ЭКОВУТ – это путь решения ряда экологических проблем.

Протекание гетерогенных реакций горения топлива ЭКОВУТ в полувосстановительной среде, обогащенной водяным паром, высокая степень выгорания горючей массы топлива при меньших температурах продуктов сгорания в топке и избытке организованно подаваемого воздуха не более 3-5%, приводит к резкому, на 80-90 %, снижению образования оксидов азота.

Соединения щелочных и щелочноземельных металлов, содержащиеся в минеральной части угля, в процессе горения капель топлива ЭКОВУТ вступают в химическое взаимодействие с серосодержащими его компонентами и связывают в результате серу топлива. При этом выбросы в атмосферу с продуктами сгорания оксидов серы сокращаются на 70-85 %.

Высокая степень выгорания топлива ЭКОВУТ обеспечивает очень низкую потерю теплоты от механической неполнотой сгорания (менее 1 %), что приводит к практической ликвидации выбросов частиц несгоревшего углерода в атмосферу.

Водяной пар в зоне гетерогенного реагирования капель топлива ЭКОВУТ, выполняя роль промежуточного окислителя, существенно ускоряет суммарный процесс выгорания этого топлива и полностью исключают потерю теплоты от химической неполноты сгорания, а, следовательно, и выбросы в атмосферу монооксида углерода, вторичных углеводородов, сажи и бенз(а)пирена.

Благодаря большому размеру частиц агломерированной золы степень очистки уходящих газов от частиц летучей золы топлива ЭКОВУТ даже в батарейных циклонах составляет более 99 %.

Сравнение параметров работы парового котла ТП-230-2М (D=250 т п./ч, $t_{п.п.}=540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{п.п.}=10\text{ МПа}$) при работе на угольной пыли и топливе ЭКОВУТ изготовленного из того же угля (по результатам тепловых расчетов, нагрузка котла 100 %)

№ п. п.	Наименование параметра	Единица измерения	Кузнецкий бассейн, шахта имени «Калинина»		Экибастузское мест., разрез «Богатырь»	
			Уголь марки 2СС	ЭКОВУТ	Уголь марки ССР	ЭКОВУТ
1	2	3	4	5	6	7
1	Влажность топлива на рабочую массу	%	6,00	42,00	10,00	37,00
2	Зольность топлива на сухую массу	%	15,50	15,52	36,30	26,00
3	Низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу	кДж/кг (ккал/кг)	25428,7 (6073,6)	14744,0 (3521,5)	17984,7 (4295,6)	13914,2 (3323,4)
4	Избыток организованно подаваемого дут. воздуха	-	1,1	1,05	1,1	1,05
5	Потеря теплоты топлива от химического недожога	%	0,5	0,0	0,5	0,0
6	Потеря теплоты топлива от механического недожога	%	2,5	0,5	2,5	0,5
7	Потеря теплоты топлива с уходящими газами	%	5,9	7,6	6,8	8,2
8	К. П. Д. котла	%	90,6	91,4	89,7	90,8
9	Расход топлива	кг/ч	26687,9	46928,4	39224,4	50440,6
10	Удельный расход топлива	кг/ч т. п.	106,75	187,71	156,90	201,76
11	Удельный расход условного топлива	кг/ч т. п.	92,62	94,43	96,28	95,78
12	Адиабатическая температура продуктов сгорания	$^{\circ}\text{C}$	2074	1820	1908	1761
13	Температура продуктов сгорания на выходе из топки	$^{\circ}\text{C}$	1156	1093	1132	1087
14	Температура уходящих газов	$^{\circ}\text{C}$	149	157	154	160
15	Температура точки росы в уходящих газах	$^{\circ}\text{C}$	62	79	83	101
16	Необходимая производительность дутьевого вентилятора (с запасом 10 %)	$\text{м}^3/\text{ч}$	208932	216321	232609	231288
17	Необходимая производительность дымососа (с запасом 10 %)	$\text{м}^3/\text{ч}$	266529	309573	298619	326694

18	Увеличение объема уходящих газов при сжигании ЭКОВУТ	%	-	13,9	-	8,6
----	--	---	---	------	---	-----

**Сравнение параметров работы парового котла БКЗ-120-100 ГМ
при работе на мазуте марки М100 и топливе ЭКОВУТ с А^д не более
1,5 %
(по результатам тепловых расчетов, нагрузка котла 100 %)**

№ п. п.	Наименование параметра	Единица измере- ния	Мазут марки М100	ЭКОВУТ из угля марки 2СС, шахты им. «Калинина», Кузнецкого бассейна	ЭКОВУТ из угля марки ССР, разреза «Бога- тырь», Экибастуз- ского мест.
1	Влажность топлива на рабо- чую массу	%	0,5	35,00	35,00
2	Зольность топлива на сухую массу	%	0,033	1,00	1,49
3	Низшая теплота сгорания то- плива на рабочую массу	кДж/кг (ккал/кг)	40695,9 (9720,0)	19859,0 (4743,2)	19500,3 (4657,6)
4	Избыток организованно пода- ваемого дут. воздуха	-	1,05	1,05	1,05
5	Потеря теплоты топлива от химического недожога	%	0,5	0,0	0,0
6	Потеря теплоты топлива от механического недожога	%	0,2	0,5	0,5
7	Потеря теплоты топлива с уходящими газами	%	6,8	7,1	7,5
8	К. П. Д. котла	%	91,8	91,7	91,3
9	Расход топлива	кг/ч	7955,2	16344,8	16703,5
10	Удельный расход топлива	кг/ч т. п.	66,29	136,21	139,20
11	Удельный расход условного топлива	кг/ч т. п.	92,04	92,29	92,61
12	Адиабатическая температура продуктов сгорания	°С	2144	1993	1917
13	Температура продуктов сгора- ния на выходе из топки	°С	1131	1155	1170
14	Температура уходящих газов	°С	179	172	175
15	Температура точки росы в уходящих газах	°С	94	73	96
16	Необходимая производи- тельность дутьевого вентилятора (с запасом 10 %)	м ³ /ч	96660	98960	105202
17	Увеличение объема дутьевого воздуха при сжигании ЭКО- ВУТ	%	-	2,32	8,12
18	Необходимая производи- тельность дымососа(с запасом 10	м ³ /ч	119430	128426	135764

	%)				
19	Увеличение объема уходящих газов при сжигании ЭКОВУТ	%	-	7,00	12,03