

ВЫСОКОЗОЛЬНЫЕ УГОЛЬНЫЕ ШЛАМЫ — ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Круть А.А., канд. техн. наук, Миттопэнерго Украины

Папаяни Ф.А., канд. техн. наук, НПО «Хаймек»

Utilization of high-ash coal slimes (tailings) does not only improve the ecological situation in industrial densely populated areas, but also present an additional low-cost source of power. Coal-water fuel, produced from coal fines, can be efficiently fired in boilers of any type for reburning or NO_x emission control purposes.

Интенсификация добычи угля, как основного энергоносителя, при одновременном ухудшении его качества, а также требования экологической чистоты сжигания топлива приводят, к повышению объема переработки его обогатительными фабриками с соответствующим увеличением глубины обогащения.

Процесс этот сопровождается повышенным выходом высокозольной обводнённой угольной мелочи (шламов), что и в технологическом, и в экологическом и, в конечном счёте, экономическом аспектах создаёт определённые проблемы, требующие своего решения.

Необходимость захоронения огромного количества угольных шламов выводит из сферы полезного использования значительные площади земельных угодий и приводит к весьма ощутимым потерям энергоносителей.

Именно эти обстоятельства в сочетании с насущной необходимостью поиска дополнительных дешёвых топливных ресурсов являются источником пробудившегося в последнее время, как в Украине, так и в других, в том числе высокоразвитых странах, интереса к повторному использованию высокозольных угольных шламов — отходов углеобогащения. Целым рядом научно-практических разработок показано, что угольные шламы из источника многих неприятностей сравнительно просто могут быть превращены в источник дохода.

Наиболее целесообразным признано использование угольных шламов в качестве исходного продукта для приготовления водоугольного топлива. Положительным фактором в этом случае является то обстоятельство, что уголь уже измельчён и, следовательно, энергоёмкость процесса приготовления ВУТ будет существенно снижена по сравнению с рядовым углем. Известны случаи, когда угольный шлам обогатительной фабрики приобретал качества ВУТ уже при простом сгущении без дополнительного измельчения (ОФ «Северная», ГХК «Воркутауголь»). Однако, высокая зольность угольных шламов создаёт определённые трудности, которые, тем не менее, не являются непреодолимыми.

Известно, что зольность твёрдых топлив является основным фактором, определяющим его энергетический потенциал, а следовательно товарную ценность. В полной мере это положение относится к водоугольному топливу, когда содержание минеральных примесей в исходном угле является еще и фактором, определяющим не только топочные, но в значительной мере, реологические характеристики и седиментационную устойчивость ВУТ.

Влиянию зольности на характеристики водоугольного топлива было посвящено большое количество исследований, как в нашей стране, так и за рубежом. К сожалению, диапазон изменения зольности большей части из них был ограничен соображениями достижения максимального энергетического потенциала, исходя из назначения ВУТ, как заменителя природного газа и мазута, т.е. основного котельного и печного топлива.

В то же время, известны обнадёживающие данные, подтверждающие возможность приготовления ВУТ на базе угля со сравнительно высокой зольностью. Так специалистами НПО «Хаймек» (Власов Ю.Ф., Башкарова И.Н.) было приготовлено водоугольное топливо на базе антрацитового шлама зольностью 34,5 % с массовой концентрацией 62,8 % и эффективной вязкостью 0,82 Па·с при градиенте скорости 9 с^{-1} , оставшееся стабильным в течение 15 суток. Там же было приготовлено ВУТ из шламов газовых углей с зольностью 42,86 % с массовой концентрацией 63,1 % и эффективной вязкостью 1,1 Па·с при градиенте скорости 9 с^{-1} , стабильное в течение 10 суток.

Дальнейшее развитие эти исследования получили в работе В.И. Мурко [1]. В этих исследованиях водоугольная суспензия рассматривалась, как сложная система, состоящая из стабилизированной дисперсной системы (СДС), т.е. жидкой фазы, включающей тонкодиспергированные твёрдые частицы ($< 5 \text{ мкм}$ со средним размером d_n), представленные в основном минеральными составляющими угля и более крупных частиц органической части угля.

Основной упор в этих исследованиях был сделан на изучение влияния содержания и вида минеральных включений на энергоёмкость диспергирования угля и стабильность ВУС. Исследования были выполнены на малометаморфизированных углях Кузбасса, породные прослои которых представлены в основном аргиллитами, редко песчаными и ещё реже углистыми. В совокупности с боковыми породами эти прослои составляют легкоразмокаемую минеральную часть угля т.е. зольность. В результате мокрого помола распределение содержания золы по классам крупности изменяется и в составе водоугольного топлива образуется значительное количество мелких, микронных размеров частичек, на 80 % представленных алюмосиликатами.

В результате стендовых исследований было установлено, что зольность наряду с крупностью исходного угля оказывает существенное влияние на скорость и энергоёмкость измельчения. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими проработками показало, что основная доля частиц твёрдой фазы ВУС (при $D < D_{max} = 350$ мкм) агрегируется в достаточно прочную структуру только при наличии необходимого количества тонкодисперсных гидрофильных частиц дисперсионной среды. При этом увеличение зольности исходного угля обеспечивает необходимую устойчивость водоугольных суспензий при меньшей массовой доле твердой фазы (рис. 1). Происходящее при этом увеличение вязкости нейтрализуется применением соответствующих химических добавок-пластификаторов.

Заинтересованность в утилизации высокозольных угольных шламов, как дополнительного источника дешёвых энергоносителей послужила стимулом к разработке технологий совместного сжигания ВУТ, приготовленного на базе извлечённого из шламонакопителей мелкого угля с основным топливом (в англоязычной литературе — технология «Co-firing») и в первую очередь с пылевидным углём [3].

Идея совместного сжигания ВУТ с угольной пылью привлекательна в том плане, что к качеству такого топлива предъявляются менее жёсткие требования, чем традиционно выдвигающиеся по отношению к водоугольному топливу, как к заменителю мазута. Основными характерными особенностями при этом являются:

- нет необходимости обеспечения длительной седиментационной стабильности, поскольку ВУТ не является основным топливом и не предназначено для длительного хранения;

- концентрация ВУТ может быть сравнительно низкой, т.к. этим топливом обеспечивается, как правило, не более 20 % подводимой тепловой энергии. Стабильность факела обеспечивается сжиганием пылевидного угля;

- гранулометрический состав исходного для приготовления ВУТ угля не имеет решающего значения, как в случае высококонцентрированного водоугольного топлива, что обусловлено его пониженной концентрацией; величина вязкости, однако, должна выдерживаться в пределах до 1-1,2 Па·с;

- зольность не вызывает серьёзных проблем в плане образования и удаления очаговых остатков, поскольку котлы, предназначенные для сжигания угля, изначально оборудованы системами гидрозолаудаления. Тем не менее желательно, чтобы зольность ВУТ не превышала зольности основного угля;

- распыление ВУТ не вызывает таких проблем, как при 100 %-ном сжигании и использование дорогостоящих химдобавок может не понадобиться.

Привлекательность технологии co-firing по отношению к ВУТ и пылевидному углю подтверждается анализом технологических вариантов его использования в качестве добавок к основному топливу. При этом сразу же возникает проблема вторичного обогащения шламов, что с одной стороны стабилизирует качество исходного продукта для приготовления ВУТ и тем самым обеспечивает необходимый уровень топочных и реологических характеристик. Способы обогащения могут быть и самыми простыми (отсеивание наиболее тонких и зольных частиц или использование вертикальных спиральных классификаторов) и сложными (комплекс из нескольких технологических линий с использованием гравитации и поверхностных свойств материала). Для того, чтобы в течение небольшого периода работы обогатительной установки расходы на неё окупались, она должна быть простой и дешёвой, или спроектированной с учётом возможности демонтажа и перемещения на другой участок.

Большой объём работ в этом направлении был выполнен в США [7]. Специалистами Научно-исследовательской корпорации энергетики и охраны окружающей среды (EER) в содружестве с GPU/GENCO, научно-исследовательским институтом электроэнергетики, группой обогащения угля (EPRI-UCIG) и пользователями электроэнергии была выполнена серия полномасштабных демонстрационных испытаний по сжиганию co-firing водоугольного топлива низкой концентрации на основе угольного шлама. Испытания проводились в котлоагрегатах с камерными, тангенциальными и циклонными топками. На пилотной установке были проведены исследования по сжиганию ВУТ в качестве дожигового топлива.

Для сжигания в котлоагрегатах с камерными и тангенциальными топками угольные шламы необходимо было обогащать до зольности 10 % на сухую

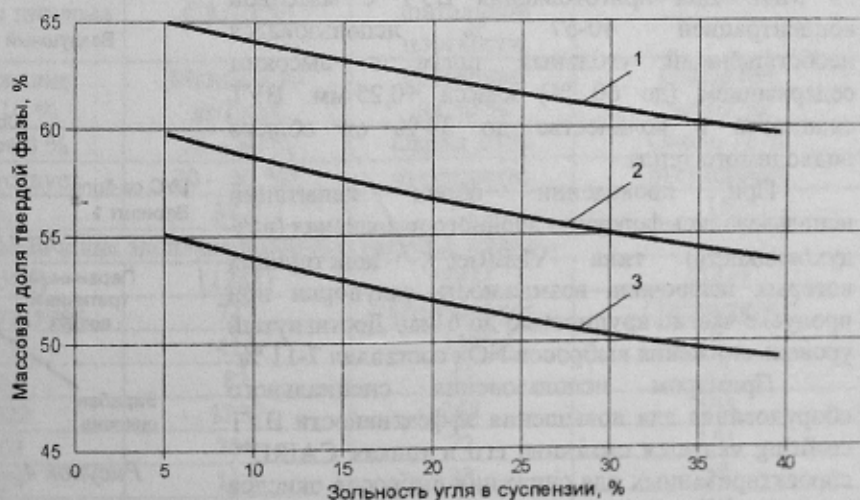


Рисунок 1 - Зависимость массовой доли твёрдой фазы от зольности угля при образовании устойчивой структуры водоугольной суспензии:

$$1 - d_v = 1,8 \times 10^{-6}; \quad 2 - d_v = 1,5 \times 10^{-6}; \quad 3 - d_v = 3 \times 10^{-6}$$

массу при содержании 75 % класса менее 0,074 мм и крупнее 0,25 мм — не более 0,5 %. Основным направлением при исследованиях было достижение дополнительного снижения выбросов окислов азота. Испытания проводились на двух котлах с расположением горелок на вертикальных экранах мощностью по 32 МВт с использованием на одном горелок Flamest EER, обеспечивающих низкие выбросы NOx и на другом — круглых горелок фирмы Бабкок-Вилькокс с модифицированным воздушным регистром (рис. 2).

В обоих случаях достигнуто снижение выбросов NOx, но большее (25 % при сжигании ВУТ в объёме 20 % от подводимого тепла) только при применении горелки с низким выходом окислов азота. Тепловые и эксплуатационные характеристики котлов не ухудшились. Температура, давление и производительность по пару, а также другие измеряемые параметры оставались, по существу, постоянными. Как и ожидалось, к.п.д. котлов снизился на 1-2 % вследствие потерь тепла на испарение водной фазы ВУТ. Уровень монооксида углерода составлял менее 0,125 г/м³.

Подобные исследования были проведены в котлоагрегате с тангенциальной топкой (рис. 3) мощностью 148 МВт.

Горелки были размещены на четырёх уровнях по четыре горелки в каждом. ВУТ в количестве до 30 % от общего подводимого тепла подавалось через все четыре горелки на втором и четвёртом уровнях. При практически не изменившихся характеристиках котла выбросы NOx снизились на 38 %.

Демонстрационное сжигание ВУТ по технологии co-firing было проведено в котлах с циклонными топками (рис. 4) на электростанции TVA's Paradise в Дрейксборо, шт. Кентукки мощностью 704 МВт и Southern Illinois Power Cooperative's в Мэрионе, шт. Иллинойс мощностью 33 МВт. Для приготовления ВУТ с массовой концентрацией 40-57 % использовался необогащённый угольный шлак с высоким содержанием (до 60 %) класса +0,25 мм. ВУТ сжигалось в количестве до 34 % от общего подводимого тепла.

При проведении обоих испытаний использовались форсунки двойного назначения (воздух/жидкость) типа VEERjet™, конструкция которых исключала возможность закупорки при пропуске частиц крупностью до 6 мм. Достигнутый уровень снижения выбросов NOx составлял 7-11 %.

Примером использования специального оборудования для повышения эффективности ВУТ co-firing является сжигание его в топках CAIRE™, спроектированных для снижения выбросов окислов азота, а также осаждения серы и золы в виде расплавленного шлака с последующим охлаждением и удалением водой (рис.5). С использованием ступенчатой топки и системы острого дутья выбросы NOx могут быть снижены до 0,27 кг/Гкал..

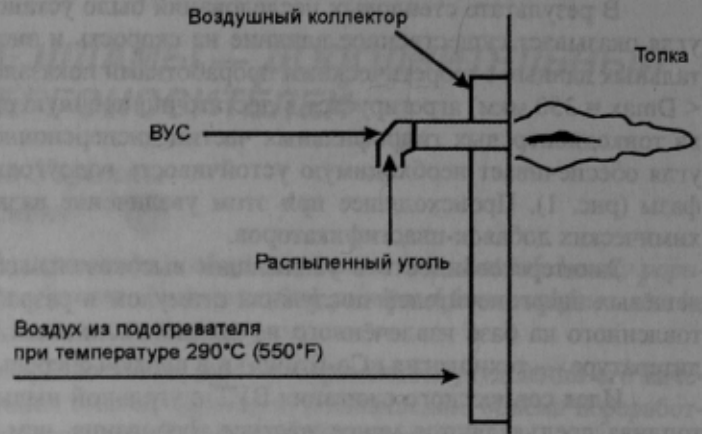


Рисунок 2 - Схематическое изображение вертикальной проекции ВУТ co-firing в котле с расположением горелок на вертикальных экранах

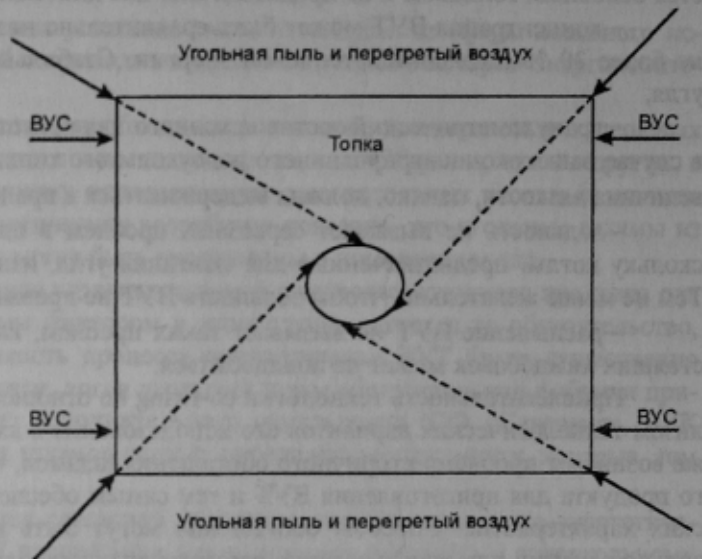


Рисунок 3 - Вид в плане схемы ВУТ co-firing в котле с тангенциальной топкой

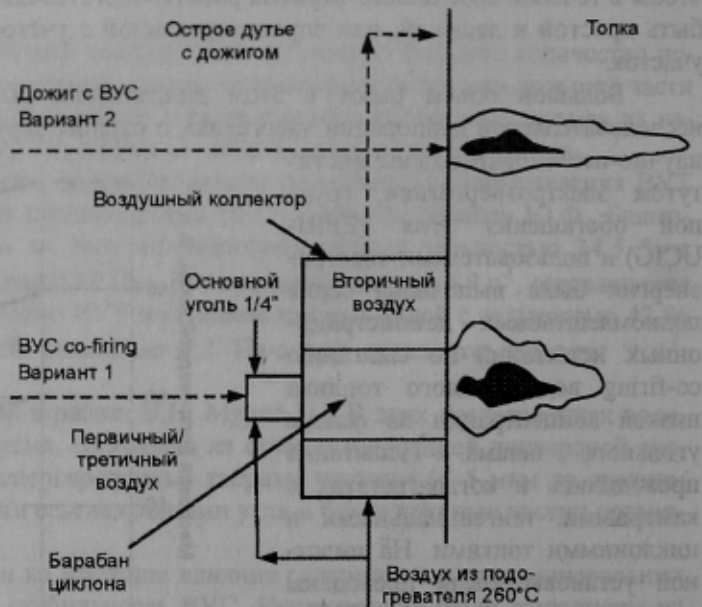


Рисунок 4 - ВУТ co-firing и дождик в котле с циклонной топкой

Особым случаем ВУТ co-firing является использование водоугольной суспензии в качестве дожигового топлива. Испытания были проведены на башенной топке EER, конструкция которой в точности воспроизводила условия полномасштабного котлоагрегата с циклонной топкой в том числе по температуре и составу дымовых газов (рис. 4). В качестве распылителя были использованы форсунки VEERjet™. Переменными величинами в процессе испытаний были стехиометрические параметры дожигового воздуха, крупность угольных частиц, температура в зоне дожига, конверсия углерода, время пребывания в зоне дожига и т.д. Расход дожигового топлива составлял от 10 до 29 % от общего количества подводимого тепла. При уровне выбросов NOx в первичной зоне 3,2 кг/Гкал. и времени пребывания в зоне 0,53 сек. с температурой около 1500°C подвод ВУТ в количестве 25 % от подведенного тепла обеспечил общее снижение выбросов окислов азота на 77 %.

В табл. 1 приведено технико-экономическое сравнение вариантов сжигания ВУТ на базе угольных шламов. Все капитальные вложения и эксплуатационные затраты приведены к условиям применения технологии в котлоагрегате мощностью 300 МВт при коэффициенте производительности 65 %. Покупная стоимость основного угля принята \$3,97/Гкал.

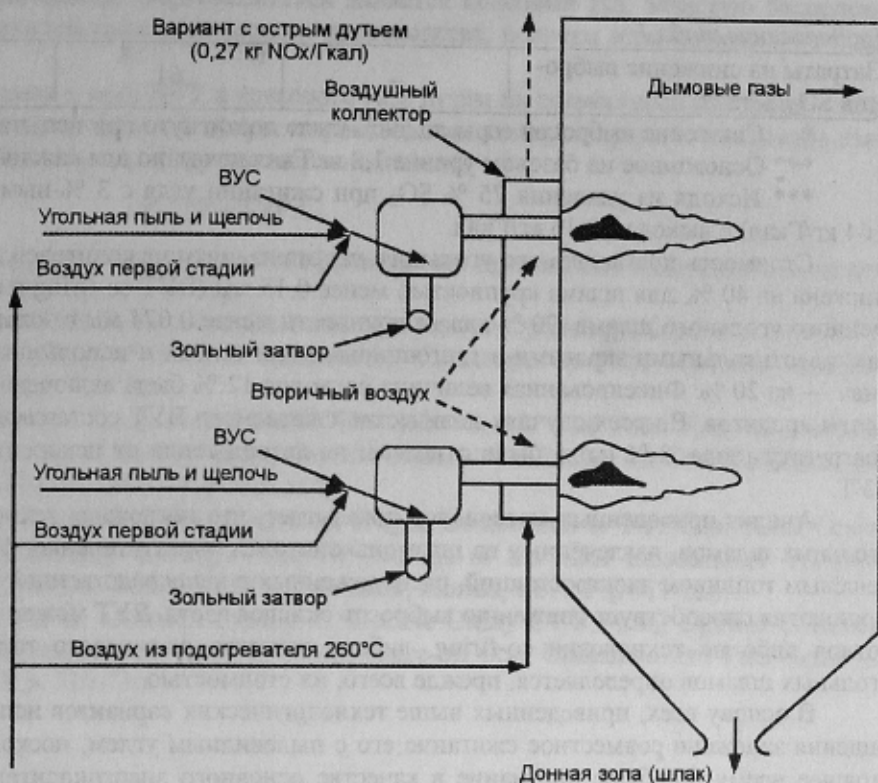


Рисунок 5 - Топка CAIRE™ в котле с расположением горелок на вертикальных экранах, модифицированная для комбинированного сжигания ВУТ с угольной пылью

Таблица 1 - Технико-экономическое сравнение технологических вариантов сжигания ВУТ

Тип котла	Циклонный	Тангенциальный или с расположением горелок на вертикальном экране		Циклонный
	Барaban циклона	CAIRE™	Горелки в горизонтальной плоскости	ВУТ дожиг
Технология	В У Т co-firing			ВУТ дожиг
Выбросы Nox	Снижение на 10 %	Менее 0,54 кг/Гкал	Снижение на 30 %	Снижение на 65 %
Удаление твёрдых частиц	70 – 80 %	70 – 80 %	Около 20 %	Около 10 %
Снижение SO ₂	отсутствует	70 – 90 %*	отсутствует	отсутствует
Капитальные вложения \$/кВт	6,2	34,0	7,2	15
Ежегодное увеличение эксплуатационных затрат \$ 1000's				
Уголь	(1503)	(1281)	(581)	(581)
Известняк	Отсутствует	717	Отсутствует	Отсутствует
Золуудаление	191	415	239	0
Электроэнергия	62	82	82	82
Фиксированные затраты	222	1237	258	538
Монтаж	62	309	72	151
Накладные расходы	24	111	28	58
Страхование и налоги	50	278	58	121
Общие эксплуатационные затраты, \$	(892)	1868	156	369
Затраты на сокращение выбросов NO _x \$/т**	(1043)	312	60	66

Затраты на снижение выбросов SO ₂ , \$/т***	-	61	-	-
--	---	----	---	---

* Снижение выбросов серы до 59 % было достигнуто при испытаниях на пилотной установке.

** Основанное на базовом уровне 1,8 кг/Гкал показано для каждой технологии.

*** Исходя из удаления 75 % SO₂ при сжигании угля с 3 %-ным содержанием серы (базовый уровень 8,64 кг/Гкал) с выходом 2,16 кг/Гкал.

Стоимость поставляемого угольного шлама из шламонакопителей для ВУТ co-firing в циклонных топках снижена на 40 %, для шлама крупностью менее 0,15 мм (ВУТ co-firing в ступенчатой топке) — на 30 %, обогащенного угольного шлама (70 % класса крупности менее 0,074 мм с зольностью 10 %) для ВУТ co-firing в топках с вертикальными экранами и тангенциальных топках и использования ВУТ в качестве дожигового топлива — на 20 %. Фиксированная величина расходов 12 % была включена в эксплуатационные расходы для выплаты кредитов. Во всех случаях количество сжигаемого ВУТ составляло 25 % от общего подводимого к котлоагрегату тепла. 2 % к.п.д. были отнесены на потери тепла от испарения воды с компенсацией добавлением ВУТ.

Анализ приведенных материалов показывает, что несложная технология приготовления ВУТ на основе угольных шламов, извлечённых из шламонакопителей обогатительных фабрик, даёт возможность обеспечения дешёвым топливом электростанций, расположенных в непосредственной близости. Кроме того такая недорогая технология способствует снижению выбросов окислов азота. ВУТ можно сжигать в топках всех энергетических котлов либо по технологии co-firing, либо в качестве дожигового топлива. Эффективность использования угольных шламов определяется, прежде всего, их стоимостью.

В основу всех, приведенных выше технологических вариантов использования ВУТ на базе отходов обогащения заложено совместное сжигание его с пылевидным углем, поскольку именно уголь приобретает в настоящее время всеобщее признание в качестве основного энергоносителя. Хотя результаты внедрения такой технологии оцениваются по уменьшению стоимости топлива и снижению уровня выбросов окислов азота, решается при этом, по существу, проблема поиска дополнительных ресурсов энергоносителей, что переплетается с проблемой энергосбережения.

В последнем случае весьма актуальным представляется сжигание ВУТ на базе отходов обогащения — высокозольных угольных шламов совместно с природным газом, результатом которого будет не только снижение стоимости конечного продукта производства, но и высвобождение этого остродефицитного энергоносителя для более рационального использования. Специалистами АОЗТ НПО «Хаймек» было подготовлено водоугольное топливо на базе антрацитовых шламов с зольностью 34,5 % с массовой концентрацией 63 %. Краткость времени (35 мин.) сжигания этого ВУТ в обжиговой печи цементного завода еще не даёт возможности оценить в полной мере достоинства такой технологии, однако, позволяет сделать весьма обнадеживающие прогнозы.

Предварительные расчёты показывают, что замена 25 % подводимого тепла за счёт такого ВУТ в четырёх обжиговых печах цементного завода с общей производительностью по клинкеру 117 т/ч позволяет ежегодно высвободить 46 368 тысяч куб.м природного газа, получив при этом экономию по стоимости топлива в 2 476 656 у.е. Практическая реализация такого проекта требует предварительного проведения полномасштабных испытаний в течение нескольких суток, что даст возможность проследить за термическими и эксплуатационными характеристиками обжиговой печи, а также качеством изготовляемого клинкера.

Ещё более интересным представляется проект сжигания угольных шламов коксующихся углей совместно с коксовым газом. В этом случае и то и другое топливо являются отходами производства. Так например, на Авдеевском коксохимическом заводе каждый час сжигается 30 000 м³ излишков коксового газа с теплотворной способностью 4000 ккал/м³. В непосредственной близости от АКХЗ расположен шламонакопитель в котором заскладировано около 5 млн. тонн шлама коксующихся углей с зольностью до 50 % на сухую массу, на основе которого может быть приготовлено ВУТ с низшей теплотой сгорания 2204 ккал/кг и седиментационной стабильностью до 10 суток. Если сжигать такое ВУТ совместно с коксовым газом в количестве 20 % от подводимого тепла в энергоблоке мощностью 50 МВт в течение 7000 часов в год, то прибыль от продажи выработанной электроэнергии составит 7 149 255 у.е., что соответствует стоимости 89 млн. куб. м природного газа.

Выводы.

1. Высокозольные угольные и антрацитовые шламы, извлекаемые из шламонакопителей или отбираемые из технологических линий углеобогатительных фабрик, могут явиться дополнительным ресурсом дешёвых энергоносителей, с большой эффективностью используемых в виде водоугольного топлива при совместном сжигании с высококалорийным основным топливом в количестве до 15-30 % от общего подвода тепловой энергии.

2. Экономическая целесообразность использования угольных шламов в виде ВУТ достигается за счёт снижения стоимости топлива, транспортных расходов и затрат на устройство новых и поддержание действующих шламонакопителей. Немаловажное значение имеет экологический эффект от снижения выбросов твёрдых частиц, окислов азота и серы, а также устранения угрозы прорыва дамб и обвалований с паводковыми водами, загрязнения естественных и искусственных водоёмов и сохранения земельных угодий.

3. Другим дополнительным источником энергоносителей является коксовый газ, зачастую бесполезно сжигаемый в атмосфере, в качестве отходов коксохимического производства, вопреки всем нормам и требованиям охраны окружающей среды.

4. Использование угольных шламов в виде ВУТ и коксового газа путём их совместного сжигания в энергетических котлоагрегатах может дать существенный прирост производства электроэнергии и тем самым сэкономить значительное количество природного газа и других энергоносителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурко В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий.//Автореферат докт. диссертации. - М. - 1999. - 48 стр.

2. Benedek K.R. et al. Coal-Fueled Diesels for Modular Power Generation-Operating Experience with 1,7 % Ash Coal-Water Slurry Fuels// The Proceedings of the 20th International Conference on Coal Utilization and Fuel Systems.-March 1995.-Clearwater, USA.-P.p. 721-723.

3. Miller Sharon Falcone, Morrison Joel L., Scaroni Alan W. The Utilization of Coal Pond Fines as Feedstock for Coal-Water Slurry Fuels// The Proceedings of the 20th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems.-March, 1995.-Clearwater, Florida, USA.- P.p. 535-545.

4. Murrell Frederick J., Ashworth Robert A. Using Low Cost Staged Combustion to Fire Coal Fines Co-fire Coal/Waste «A Low Cost Fuel and Technology Strategy»//The Proceedings of the 22nd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems.-March, 1997.- Clearwater, Florida, USA.-P.p 617-626.

5. Ashworth Robert A., Melick Todd a., Morrison Donald K. Electric Utility CWS Firing Options to Reduce NOx Emissions//The Proceeding of 23rd International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems.- March, 1998.-Clearwater, Florida, USA.-P.p. 719-730.