

# СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА



О.О. Архипкин



А.Г. Морозов

Текст. рез. на английском языке

**Известно, что угольные электростанции наиболее «грязный» источник генерации энергии, эксплуатация которых сопровождается эмиссией оксидов серы и азота, тяжелых металлов и хранением больших объемов золы, образующейся в результате сжигания углей. Первый недостаток приводит к возникновению сернокислотных дождей, пагубно влияющих на растения, почву, на организм животных и здоровье человека. Кроме того, сжигание угля не всегда производится эффективно. К примеру, механический недожог на котельных со слоевым сжиганием угля может превышать 30%. Это значит, что только 70% угля выгорает, остальное уходит в не утилизируемый угольный шлак. Применяемые в отечественной энергетике технологии пылеугольного и слоевого сжигания угля относятся к разработкам середины прошлого века и уже не могут в полной мере удовлетворять современным требованиям энергоэффективности и экологическим нормам по эмиссии вредных веществ.**

Олег Олегович Архипкин, главный менеджер, ТОО «Спецлабприбор А»,  
 Андрей Геннадиевич Морозов, к.т.н., генеральный директор, ООО «Амальтеа-Сервис»

Для развития современной угольной энергетики необходимы новые экологически чистые и экономически выгодные технологии использования углей. Главной задачей внедрения таких технологий в энергетику страны является снижение механического недожога угля и снижение эмиссии вредных веществ.

Одной из перспективных программ развития энергоэффективной экологически чистой угольной энергетики является использование водоугольного топлива (далее ВУТ), [1,2,3].

ВУТ представляет собой мелкодисперсную смесь измельченного угля, воды и в ряде случаев стабилизирующей добавки (пластификатора), с содержанием угля 60 – 70%, воды 30 – 40%. Характеристики ВУТ представлены в Таблице 1.

По внешнему виду ВУТ является жидким топливом с вязкостью, близкой к мазуту, и может быть использовано для выработки тепла и электричества, как на угольных котлоагрегатах, так и на газомазутных котлоагрегатах взамен газа и мазута.

Водоугольное топливо обладает рядом существенных преимуществ: возможностью изготовления топлива из угольных шламов, бурого угля, сланцев и торфа; высокой глубиной выгорания угля (не ниже 98%); горением с газификацией (образование и горение  $CO + H_2$ ); простотой транспортировки и хранения (необходимый нагрев емкостей с ВУТ составляет 10 °С, против 70 °С для мазута); взрыво- и пожаробезопасность; снижением эмиссии оксидов азота и серы, возможностью полной утилизации отходов, сжигание ВУТ значительно снижает вероятность шлакообразования, снижающего теплопроводность трубной части котлов и эффективность сжигания топлива.

Таблица 1. Характеристики ВУТ

Показатель	Значение
Массовая доля твёрдой фазы (угля), %	> 58
Гранулометрический состав	97% фракции менее 100 мкм
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	~ 1200
Зольность твёрдой фазы, %	5 - 30 (зависит от марки угля)
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	2300 - 4200 (зависит от марки угля)
Вязкость, при скорости сдвига 81с, мПа·с	не более 1000
Температура воспламенения, °С	450 - 650
Температура горения, °С	850 - 1000
Статическая стабильность, суток	от 30
Температура замерзания, °С	0 (без добавок)

Эффективность сжигания водоугольного топлива, была многократно проверена и апробирована за более чем полувековую историю развития и применения водоугольных суспензий. В советском союзе с 1959 года велись в рамках программы по внедрению водоугольного топлива объёмные НИР и НИОКР технологий производства, транспортировки и горения ВУТ. Самым крупным проектом использования ВУТ в СССР стал проект углепровода Белово-Новосибирск протяжённостью 262 км, по которому транспортировалось водоугольное топливо для сжигания на Новосибирской ТЭЦ-5. Этот проект, реализованный в 1989-1993гг, преследовал целью отработку возможности транспортировки угля по углепроводу и режимов горения водоугольного топлива в энергетических котлах Новосибирской ТЭЦ-5. Проект был планомерно прекращён в 1993 году прекратил своё существование. В рамках проекта было отработано множество задач и получен значительный практический опыт по применению ВУТ.

Начиная с 1993 года ввиду низких цен на основной энергоноситель (газ) развитие ВУТ было практически приостановлено не только в России, но и на всём постсоветском пространстве. Переход к рыночным отношениям значительно повлиял на организацию, занимавшиеся внедрением ВУТ в СССР, которые унаследовали «бюджетный» подход к внедрению ВУТ, в результате, стоимость предлагаемых решений была настолько велика, что сводила на нет весь экономический эффект от внедрения ВУТ [4].

Интерес в водоугольном топливе за рубежом возник вследствие нефтяного кризиса 1973 года. Разработками и внедрением технологий ВУТ занимались более 100 крупных организаций в США, Швеции, Великобритании, Китае, Японии, Канаде, Италии и ряде других стран. После стабилизации цен на нефть в 80-х годах объём исследований заметно сократился. Новый виток роста цен на нефть и газ в конце 90-х выдвинул внедрение ВУТ в ряд приоритетных программ угольной промышленности развитых стран.

В настоящее время в КНР для технического руководства по внедрению водоугольного топлива создан Государственный центр водоугольных суспензий. В ближайшие 20 лет правительство КНР планирует довести мощности по производству ВУТ с 5 до 100 млн. т в год. Китайская компания Sino Clean Energy Inc (SCEI) специализируется на поставках ВУТ на территории Китая и является одной из наиболее быстрорастущих компаний на бирже NASDAQ (тикер SCEI).

Однако современные масштабы использования водоугольного топлива в структуре мировой энергетики несопоставимо меньше, чем потенциал заложенный в использовании ВУТ и объясняется это не только низкими ценами на нефть и газ прошлого века, но и крайне неэффективными технологиями производства ВУТ. Эти технологии характеризуются: многостадийностью, высокими энергозатратами, необходимостью использования дорогостоящих пластификаторов и значительной стоимостью оборудования приготовления ВУТ.

Высокие энергозатраты на приготовление ВУТ вызваны тем, что основным способом механического диспергирования угля, как в России, так и во всем мире является мокрый помол шаровых, стержневых или вибрационных мельницах (до 2010 года все объекты строились именно на такой технологии). В силу особенностей механических процессов помола в мельницах раздавливающе-стирающего действия непосредственно на измельчение тратится до 20% всей подведенной энергии. Энергозатраты на мокрый помол в вибромельницах составляют не менее 55 кВт·ч на 1 т продукта. [5, 6]

Серьезным недостатком шаровых и вибрационных мельниц также является крайне неоднородный зерновой состав продукта помола, который содержит и переизмельченные частицы, и, напротив, слишком крупные зерна. Поэтому в традиционных технологических схемах производства ВУТ в основном используется замкнутый цикл помола, когда полученная суспензия подвергается сепарированию с последующим домолом выделенных крупных зерен. Все это в совокупности с необходимостью добавки пластификаторов усложняет технологический процесс и увеличивает себестоимость ВУТ.

Для устранения вышеперечисленных недостатков приготовления ВУТ и снижения себестоимости производства ВУТ, российской компанией «Амальтеа-Сервис» (vodougol.ru) был успешно разработан и внедрен в производство коммерчески эффективный инновационный метод пригото-



Рис. 1. Гидроударный узел мокрого помола: перед отправкой Заказчику (вверху) и смонтированный силами Заказчика (внизу)

ления ВУТ на основе гидроударного узла мокрого помола (далее по тексту ГУУМП). В технологии ГУУМП используется тот факт, что основные виды минерального сырья, в том числе и уголь, являются хрупкими на растяжение материалами, их прочность на растяжение или изгиб обычно в 6-12 раз меньше прочности на сжатие. Вращающиеся шаровые, вибрационные мельницы, кавитаторы с

их эффектом внутренней сепарации реализуют именно помол истиранием (сжатием), сопровождающийся большим расходом энергии и высоким абразивным износом мелющих тел.

В технологии ГУУМП для измельчения минерального сырья используется свободный удар. Помольная камера ГУУМП состоит из двух вращающихся в противоположные стороны роторов (корзин), насаженных на отдельные

соосные валы. На дисках роторов по концентрическим окружностям расположены ряды ударных элементов (пальцев-бил). Каждый ряд пальцев одного диска свободно входит между рядами пальцев другого диска. Уголь, подлежащий измельчению перемещаясь с водой, поступающей по патрубку, подаётся в центральную часть ротора и движется к периферии под действием центробежной силы, подвергается многократным ударам пальцев, вращающихся с высокой скоростью во встречных направлениях. Переменно-противоположное движение зерен угля, соответственно, его диспергирование с водой увеличивается по мере продвижения материала к выходу камеры помола, пока полученный помольный материал не будет выброшен из камеры. Вода в реализуемом способе измельчения является не только проводником кинетической энергии удара, доставляя его в микроструктуру частиц угля, но и снижает прочность измельчаемого твердого тела, облегчая его разрушение.

Энергозатраты приготовления ВУТ на ГУУМП составляют около 9,8 кВт•ч на 1 т продукта (более чем в 5 раз меньше, чем на вибромельницах мокрого помола). Установка ГУУМП производительностью 5 тонн ВУТ в час представлена на рисунке 1.

Большая размольная мощность ГУУМП удачно дополняется высокой избирательностью измельчения, поскольку энергия удара пропорциональна массе частицы угля, то при достижении частицами определенных минимальных размеров их дальнейшее измельчение прекращается. Таким образом, ГУУМП позволяет получать водоугольную суспензию требуемого гранулометрического состава с минимальным содержанием переизмельченных частиц и полным отсутствием крупных зерен в открытом цикле помола без использования сепараторов (рисунок 2).

Вода, поступающая в ГУУМП, проходит стадию водоподготовки в кавитационном роторно-импульсном аппарате (далее по тексту РИА), еще одной инновационной разработки «Амальтея-Сервис». Кавитационная обработка воды в РИА увеличивает pH, активирует воду, что в результате приводит к более

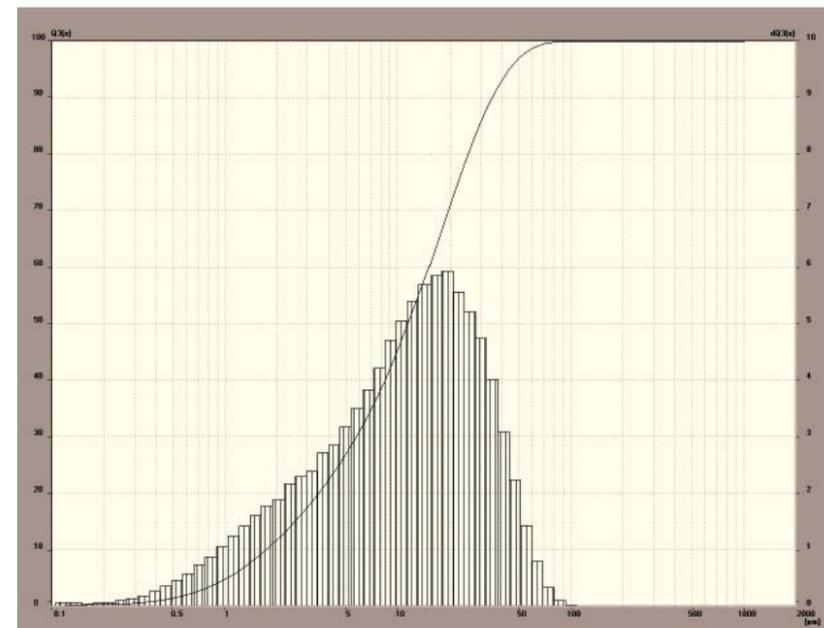


Рис. 2. Грансостав бурого угля Б2 после измельчения в ГУУМП

Таблица 2. Сравнительные характеристики комплекса приготовления ВУТ 5 т/ч на базе ГУУМП и вибромельниц ВМ-400

Оборудование	ГУУМП (5т/ч) * 1шт		ВМ-400 (1,5 т/ч) * 3 шт	
	кол-во	Мощность, кВт	кол-во	Мощность, кВт
Бункер угля, 5куб.м	да		да	
Дозатор угля	-	Входит в состав	3	-
Подача угля	-	Входит в состав	3	-
Металлоотделитель	-	Входит в состав	3	-
Активация воды	1	5	1	5
Устройство приготовления реагента	-	Не нужно	1	8
Насосы перекачки воды с реагентом	-	Не нужно	2	6
Оборудование мокрого помола (ГУУМП или ВМ-400)	1	48	3	165
Фундаменты	-	Не нужны	18,5	-
Фильтр грубой очистки (виброгрохот для ВУТ)	-	Не нужен	3	1
Гомогенизация ВУТ (насосы НДВ, 2шт)	-	Не нужны	2	44
Насос на выдачу ВУТ	-	Входит в состав	1	3
Ёмкость ВУТ	да		да	
<b>ВСЕГО установленная мощность, кВт</b>		<b>53</b>		<b>232</b>

глубокому взаимодействию воды с частицами угля в ГУУМП [7].

Результаты экспериментов показывают, что при использовании предварительной кавитационной обработки воды получаемая водоугольная суспензия на выходе ГУУМП обладает более высокой стабильностью и не требует применения дополнительных добавок (пластификаторов), как в традиционных методах приготовления.

На рисунке 3 представлены этапы приготовления ВУТ.

В технологической схеме приготовления водоугольного топлива РИА может быть использован для примешивания к воде различных жидких добавок: отходов ГСМ или мазута, стабилизаторов, раствора гидроксида кальция Ca(OH)<sub>2</sub> (для снижения эмиссии оксидов серы при горении). Как кавитатор РИА обеспечивает высокую степень гомогенизации эмульсий, без усложнения технологической схемы приготовления ВУТ.

В схеме приготовления ВУТ с использованием РИА возможно в качестве дополнительного сырья применять жидкие отходы нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности например, смывы после очистки мазутных цистерн, нефтяные шламы и т.д. Тем самым инновационный метод приготовления водоугольного топлива по схеме ГУУМП + РИА открывает возможность эффективно утилизировать различные отходы нефтяной промышленности и значительно снизить эмиссию оксидов серы, в случае добавки к воде раствора гидроксида кальция.

Габариты ГУУМП составляют примерно 2,2×2×1,8 м, поэтому данное оборудование может быть смонтировано практически на любой площадке, без создания заглублённых фундаментов, как это необходимо для стержневых и вибромельниц.

Поскольку ГУУМП является законченным комплексом оборудования, его можно рассматривать как готовый стандартный элемент технологии ВУТ. В зависимости от местных условий все сопутствующие элементы (бункеры угля, ёмкости) могут быть смонтированы на месте, что снижает стоимость всего комплекса. В отличие от своих предшественников, для заказа ГУУМП не требуется выполнение проектных

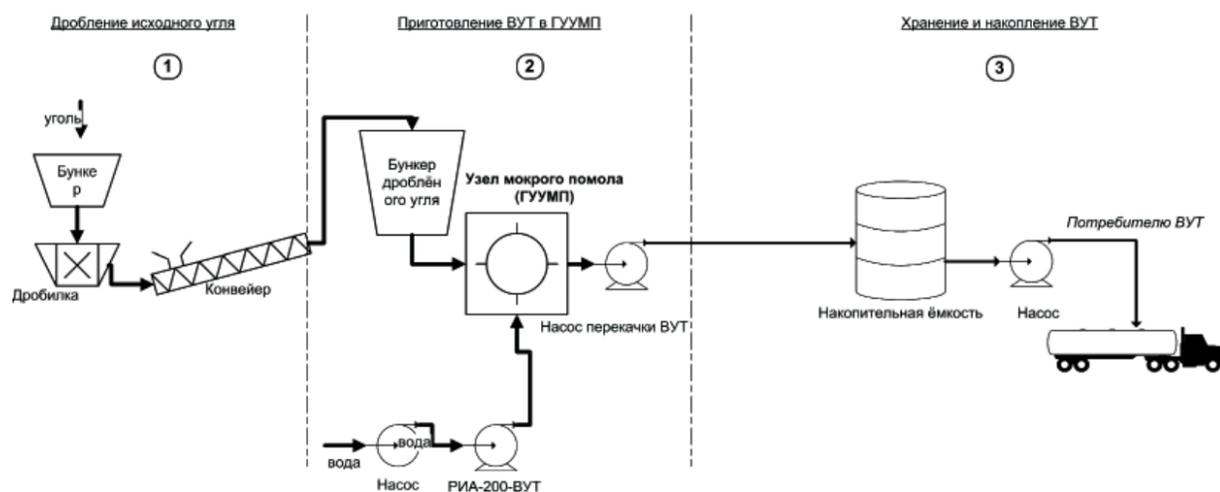


Рис. 3. Этапы приготовления ВУТ

работ. Стоимость ГУУМП примерно в 2,5 раза ниже стоимости комплекта оборудования на базе вибромельниц с аналогичным функционалом и производительности. Установленная мощность для ГУУМП составляет около 50кВт вместо 230кВт для вибромельниц и сопутствующего оборудования (см. Таблицу 2), что дополнительно снижает капитальные затраты на внедрение ВУТ. Как указывалось выше, именно высокие затраты на внедрение были одними из сдерживающих факторов массового внедрения ВУТ.

Готовое водоугольное топливо выходит из ГУУМП через 40 - 50 секунд после включения, поэтому ещё одним инновационным подходом является стратегия приготовления ВУТ ближе к моменту потребления, т.е. без его длительного хранения. Это позволяет снизить капитальные затраты на строительство ёмкостей ВУТ, добавки пластификаторов и т.д. Необходимые запасы топлива в такой идеологии лучше сохранять в форме угля.

Для использования ВУТ в энергетике кроме приготовления ВУТ, очевидно необходимы и эффективные способы его сжигания.

ВУТ возможно сжигать в большинстве существующих газомазутных и угольных котлов. На сегодняшний день апробировано более десяти типов паровых и водогрейных котлов, на которых произведено сжигание ВУТ (ДКВР, ДЕ, КЕ, БКЗ и другие). В большинстве случаев

используется факельное или вихревое сжигание. В зависимости от марок котлов и конкретной ситуации на объекте возможно сжигание ВУТ путём замены форсунок на износостойкие при работе на ВУТ в стандартных газомазутных горелках. В некоторых случаях требуется изменение аэродинамики горения топлива. Производимые изменения позволяют по-прежнему использовать не только ВУТ, но и газ и/или мазут, переводя их в разряд резервного топлива.

Производимые реконструкции позволяют сжигать ВУТ полностью самостоятельно, без стабилизации пламени мазутом или газом. Вместе с тем, в ряде случаев целесообразнее рассматривать не только полное замещение газа/мазута на ВУТ, но и частичное. Сохранение 10 - 15% мазута в топливном балансе котла может упростить его реконструкцию, что позволит снизить капитальные затраты по переводу на ВУТ.

Сам процесс горения водоугольного топлива представляет не только технический, но и научно-исследовательский интерес. Особенностью горения угля в составе ВУТ является то, что горение происходит в капле ВУТ, при этом, в отличие от пылеугольного сжигания, в горении ВУТ присутствуют как минимум два механизма:

- Классическое горение по механизму «высушивание-воспламенение-горение»;
- Разложение композиции «уголь + вода» ( $C + H_2O$ ) на синтезгаз ( $CO +$

$H_2$ ). Данный механизм (с газификацией) возникает в областях с пониженным содержанием кислорода.

Иными словами, в горении ВУТ участвует и водяной компонент топлива, благодаря которому снижается и температура воспламенения и стабильного горения ВУТ (800 - 1100 оС). Кроме того горение ВУТ с газификацией обуславливает высокую химическую и механическую полноту выгорания угля (на уровне 98%). Подобный механизм низкотемпературного горения приводит не только к снижению газообразных выбросов, но и к изменению механических свойств золы.

Снижение вредных выбросов при сжигании ВУТ, прежде всего  $NO_x$ , подтверждено исследованиями, проведенными в Государственном университете штата Пенсильвания (США), которые подтвердили экологическую эффективность ВУТ. Было отмечено значительное снижение выбросов оксидов серы и азота, причем содержание оксида азота уменьшилось не только благодаря меньшей температуре горения, но и на 26% в результате восстановительного характера реакций, возникающих в процессе сжигания ВУТ [8].

Низкий уровень температуры горения ВУТ определяет так же активное связывание оксидов серы оксидами ( $CaO, MgO$ ) минеральной части топлива, тем самым снижая выбросы оксидов серы в атмосферу.

Анализ же золы, полученной в результате сжигания ВУТ в вихревой топке показал, что такая зола является высокопористым порошком, который может использовать не только как заполнитель в бетонах (лёгких/тяжёлых, высокотемпературных, микробетонах и т.д.), но и как замена цемента (до 20%). Собственно, мировые тенденции состоят в увеличении объёма потребления подобных шлакопортландцементов (далее по тексту ШПЦ) в строительстве, доля которого составляет не менее 30 - 35%. Примерно такой же процент потребления ШПЦ был и в СССР, но ввиду известных экономических процессов его доля упала менее 10%.

Приведённые на рисунке 4 частицы золы от сжигания ВУТ содержат микропоры диаметром 1 - 2 микрона, что повышает их удельную поверхность и, следовательно, реакционную способность. Такая зола является идеальным сырьём для изготовления прочных блоков, что может быть реализовано в непосредственной близости от источника такой золы - котельных на ВУТ.

Таким образом, благодаря своим структурным особенностям, зола может быть полностью утилизирована, в производстве строительных материалов или цемента, что позволяет кардинально решить проблему с золоотвалами [9].

К инновационным разработкам, применяемым для сжигания ВУТ относится паро-пневматическую форсунку (Рисунок 5), которую можно монтировать на существующие котлы со слоевым сжиганием, что минимизирует проектную подготовку, сроки и стоимость перевода на ВУТ. Предлагаемая компанией «Амальтеа-Сервис» форсунка отличается большим диапазоном регулирования объёма подачи ВУТ (от 200 до 2000 кг в час).

Распыл ВУТ в паропневматической форсунке осуществляется за счёт формирования необходимых аэродинамических потоков распыливающего агента (воздуха), поэтому естественный абразивный износ сопла форсунки на качество распыла не влияет. Это является принципиальным преимуществом паропневматической форсунки, поскольку

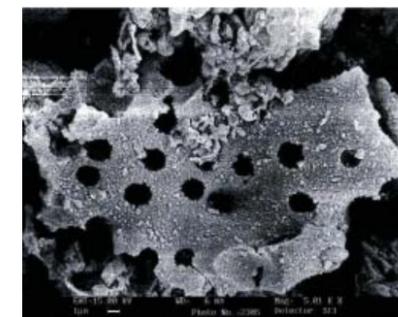


Рис. 4. Пористая структура частиц золы



Рис. 5. Паропневматическая форсунка

обеспечивает время её непрерывной работы не менее 1500 - 2000 часов.

Рассмотренные в работе инновационные методы подготовки, приготовления и сжигания водоугольного топлива свидетельствуют о перспективности для энергетики угледобывающих регионов, стран использования ВУТ. Причем, внедрение ВУТ наиболее экономически выгодно вести в направлении замещения мазута. Переход с топчного мазута, стоимостью от 300 долл. тонна, в котельных на водоугольное топливо (ВУТ), приготовленное по схеме ГУУМП+РИА позволяет снизить затраты на топливо по сравнению с мазутом в 2 - 3 раза. Причем срок окупаемости проектов по модернизации котельных под использование ВУТ и строительства комплекса его производства, окупается за 1 - 1,5 года за счет низких цен на уголь (20 - 40 долл. тонна).

Экономически эффективен и перевод на водоугольное топливо для объектов энергетики, с высоким механическим недожогом угля, а так же для автоматизации подачи топлива для котлов с ручной подачей топлива.

В первый «послекризисный» 2010 год на ВУТ с использованием ГУУМП в качестве средства приготовления был переведён газовый котёл БКЗ-120, используемый для выработки пара для турбины на химическом производстве в одной из республик Кавказа (СНГ). Установленная мощность комплекса (15 тонн ВУТ в час) является на сегодня самой крупной из существующих на постсоветском пространстве.

Внедрение водоугольного топлива станет еще одним шагом на построение экологической чистой и экономически эффективной энергетики.

**Литература**

1. Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka. Handbook of alternative fuel technologies // CRC Press. New York. 2007.
2. NEDO and IEA-eLM International Cooperation Committee, CWM in Japan. 1997.
3. Noboru Hashimoto. CWM: Its Past, Present and Future // International Journal of Coal Preparation and Utilization. London, 1999.
4. С.И. Мосин, А.Г. Морозов, Г.Н. Делягин, «Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива», г. Москва Новости Топливноэнергетического комплекса, №9, 2008г.
5. Использование вибромельниц для приготовления ВУТ. (www.liquidcoal.ru/2008/05/19/26)
6. Липилин А.В., Векслер М.С., Кореньюгина Н.В. Ударная шаровая мельница «Трибокнетика» или новая техника механического диспергирования.
7. Маргулис М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб.-пособие для хим. И мих.-тех спец. Вузов. - М., Высш. Шк., 1984. - 272 с., ил.
8. Coal- Water Slurry Fuel Combustion. (www.energy.psu.edu)
9. Зольный отход от сжигания водоугольного топлива как микронаполнитель бетонов /Крашенинников О.Н., А.Г. Морозов , А.А. Пак, И.А. // Тезисы III Международной конференции проблемы рационального использования природного и техногенного сырья баренцева региона в технологии строительных и технических материалов - Сыктывкар, 2007 г.