

УДК 622.693.4

**А. А. Круть**, канд. техн. наук, НПО «Хаймек»,  
**Л. Н. Козыряцкий**, канд. техн. наук,  
Донецкий национальный технический университет

## **ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО НА ОСНОВЕ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ**

*Показано, что необходимость поиска дополнительных источников дешевых энергоносителей в совокупности с ужесточением требований экологической безопасности стимулируют интенсификацию промышленного использования отходов углеобогащения – высокозольных угольных и антрацитовых шламов, наиболее эффективной технологией утилизации которых является приготовление водоугольного топлива для использования в теплоэнергетике.*

**топливо, водоугольное, шлам, высокоугольный, утилизация, приготовление, теплоэнергетика**

**Актуальность работы.** Компенсация недостатка внутренних энергоресурсов обуславливает необходимость импортирования значительного количества природного газа из-за рубежа, что и ставит Украину в тяжелую экономическую зависимость от поставщиков. Не менее сложная ситуация сложилась в стране с импортом нефти и нефтепродуктов. Затраты на импорт газа и нефти являются основным генератором внешнего долга, стремительный рост которого можно с полным правом рассматривать как угрозу экономической независимости страны.

Из-за ограниченных возможностей развития собственной газо- и нефтедобывающей промышленности основным энергоносителем безальтернативно остается уголь, потребителем которого является прежде всего большая теплоэнергетика, почти на 70 % представленная мощными (более 1000 МВт) теплоэлектростанциями, расположенными, как правило, в густонаселенных, промышленно развитых районах с далеко не благоприятным экологическим фоном. Кроме того, на промышленных предприятиях и в социально-бытовой сфере эксплуатируются тысячи котлов малой и средней паропроизводительности, использующих уголь при слоевом и факельном сжигании.

Возрастание доли угля в топливно-энергетическом балансе страны требует соответствующего повышения его добычи, что может быть осуществлено лишь в течение продолжительного времени путём коренной реконструкции и строительства новых шахт и требует значительных капиталовложений. В этой связи возникает проблема по-

иска дополнительных источников энергоресурсов, добыча которых может быть организована в сравнительно короткий период и не требует больших затрат. Таким источником являются отходы углеобогащения.

**Современное состояние вопроса.** В условиях повышения общего объёма добычи твердого топлива и связанного с ужесточением требований по охране окружающей среды увеличением глубины обогащения, следует ожидать, что в ближайшем будущем ежегодный выход высокозольной угольной мелочи ещё более возрастет. Уже сейчас объём отходов углеобогащения в высокоразвитых странах достигает миллиардов тонн, создавая реальную экологическую угрозу, не говоря уже о безвозвратно теряемых ресурсах энергоносителей.

В более чем восьмидесяти шламонакопителях обогатительных фабрик Украины к настоящему времени заскладировано около 117 млн. т высокозольных угольных шламов со средней зольностью около 57 %.. Кроме того, по оценкам [5] наряду с текущим заполнением шламонакопителей до 3 млн т в год, обогатительные фабрики Украины ежегодно выдают более 3,6 млн. необогащённых штыбов и отсевов зольностью до 28 %.

Образующаяся в процессе углеобогащения обводнённая угольная мелочь технологически является весьма неудобным продуктом. Транспортирование её затруднено залипанием течек и транспортеров, зависанием материала в бункерах. При складировании отходов обогащения в шламонакопителях возникают проблемы с запылением окружающего пространства и загрязнением естественных и искусственных водоёмов, не говоря уже о выводе больших земельных площадей из сферы полезного использования.,

Утилизация угольных шламов путём простого подмешивания высокозольной угольной мелочи к отгружаемому фабрикой углю снижает энергетический потенциал последнего и, следовательно, его товарную ценность. Придание обводненной угольной мелочи товарного вида требует обезвоживания и термической сушки, что связано с высокими эксплуатационными затратами. Кроме того, при работе термических сушек имеет место повышенный выброс окислов азота и увеличивается дымность. Технологический вариант обогащения угольной мелочи путём углемасляного гранулирования является процессом весьма дорогостоящим, вследствие необходимости использования связующих веществ, высокая стоимость которых существенно повышает эксплуатационные расходы.

Наиболее эффективно сжигание высокозольного угля осуществляется в топках кипящего и циркулирующего кипящего слоя при атмосферном давлении или под наддувом. Использование такой технологии, однако, возможно только в существенно модифицированных или специально сконструированных котлоагрегатах, а также при тщательном соблюдении регламентных требований к эксплуатации. В предварительном обогащении в этом случае необходимость отпадает, но капиталовложения будут весьма значительными.

Еще одним и, как показывает опыт, наиболее перспективным технологическим вариантом промышленного использования отходов обогащения является приготовление на их основе водоугольного топлива. Такое топливо, как показывает опыт мировой практики, может быть с успехом использовано в качестве дожигового топлива и для снижения выбросов окислов азота в пылеугольных котлах, а также при совместном сжиганием с природным и коксовым газом с целью снижения стоимости электрической и тепловой энергии

**Постановка задачи.** Рассматривая высокозольные угольные шламы в качестве исходного продукта для приготовления водоугольного топлива, следует исходить из того обстоятельства, что его основные характеристики определяются, главным образом, свойствами исходного продукта (энергопотенциал, зольность, выход летучих веществ) и в меньшей степени особенностями технологии приготовления (измельчение, тип пластификатора, концентрация и т. п.).

Основной характеристикой твердого топлива является степень углефикации (метаморфизма), оцениваемая по выходу летучих веществ на сухую беззольную массу. Изучение влияния этого параметра исходного продукта на топочные, реологический и седиментационные характеристики водоугольного топлива и были определены основной задачей наших исследований.

**Результаты проведенных нами исследований** показывают четкую зависимость максимально возможной концентрации водоугольного топлива, а, следовательно, его энергетического потенциала от выхода летучих веществ в исходном продукте (рис. 1)

Ориентировочно величину возможной максимальной концентрации водоугольного топлива можно определить с помощью эмпирического выражения

$$C_{zp} = 87,6V^{daf-0,095},$$

где  $V^{daf}$  – выход летучих веществ на сухое беззольное состояние, %.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что на основе антрацита ( $V^{daf} = 6,5 \%$ ) можно приготовить водоугольное топливо при

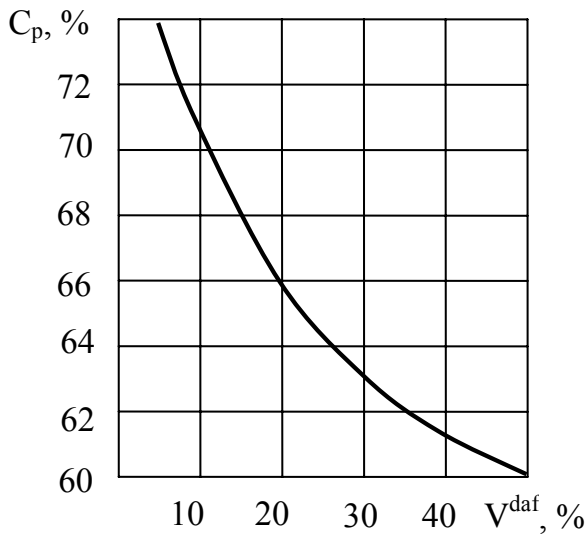


Рис. 1. Возможная степень насыщения водоугольной суспензии в зависимости от выхода летучих веществ в исходном продукте

массовой концентрации массовая  $C = 72-73 \%$  в то время как в случае угля марки Д ( $V^{daf} = 44,0 \%$ ) только  $61 \%$ . С этой точки зрения антрацитовый шлам получает преимущество по сравнению с отходами обогащения каменных углей. В обоих случаях при прочих равных условиях величина действительной массовой концентрации может отличаться от расчётной не больше чем на  $1,5\%$ .

Рабочую концентрацию водоугольного топлива определяют при помощи уравнения

$$C = K_C \cdot \frac{100 - m}{100} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_0 + a \cdot S_{ГР}},$$

где коэффициент  $K_C$  зависит от выхода летучих

$$K_C = \frac{1}{1,044 + 0,0052 \cdot V^{daf}};$$

В той же мере от выхода летучих веществ зависит и вторая топочная характеристика водоугольного топлива – температура воспламенения, которая условно принимается равной той температуре окружающей среды, при которой распылённое топливо воспламеняется в результате длительного пребывания в зоне этой температуры.

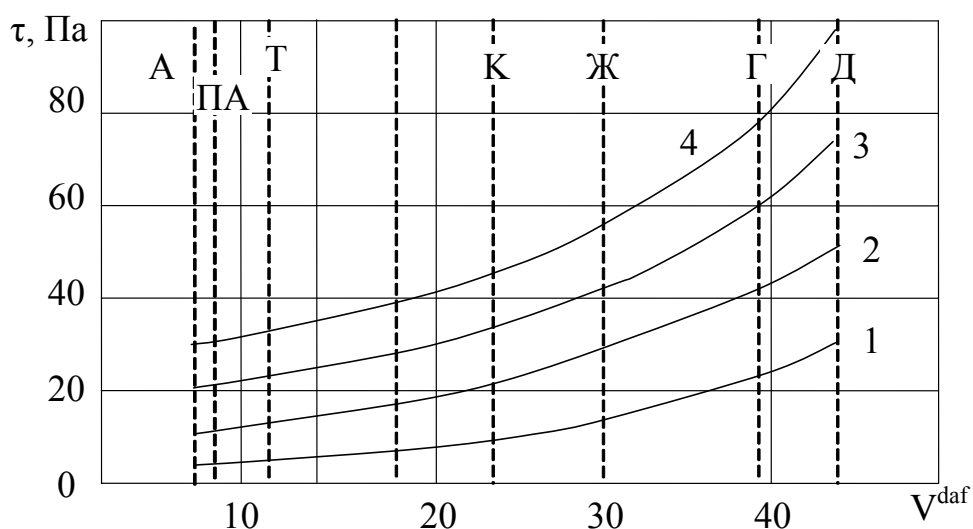
С воспламенения летучих и начинается воспламенение сухого твёрдого топлива. Чем выше выход летучих, тем ниже температура воспламенения

В случае водоугольного топлива, однако, процесс выделения летучих сдерживается испарением влаги из капли распылённого ВУТ, воспламенение которого в отличие от сухой угольной пыли начинается с гетерогенных реакций на поверхности распылённых угольных частиц. Это обстоятельство существенно снижает зависимость температуры воспламенения от выхода летучих веществ (марки угля). В то же время, активация поверхности угольных частиц в капле распы-

лѐнного топлива приводит к некоторому снижению температуры воспламенения ВУТ по сравнению с «сухим» исходным углем.

Так, например, температура воспламенения водоугольного топлива, приготовленного на основе антрацита ( $V^{\text{daf}} = 3-5\%$ ), составляет  $500-550^\circ\text{C}$ , а «сухой» антрацитовой пыли —  $900-1000^\circ\text{C}$ . Те же параметры для ВУТ, приготовленного на основе газовых углей ( $V^{\text{daf}} = 40-42\%$ ) составляют соответственно  $400-450^\circ\text{C}$  против  $650-700^\circ\text{C}$  [21].

На рис. 2 приведена зависимость касательного напряжения от выхода летучих веществ и скорости сдвига водоугольной суспензии массовой концентрацией  $C = 65\%$ , приготовленной на исходном угле всего ряда метаморфизма. при зольности  $A_d = 10\%$ .



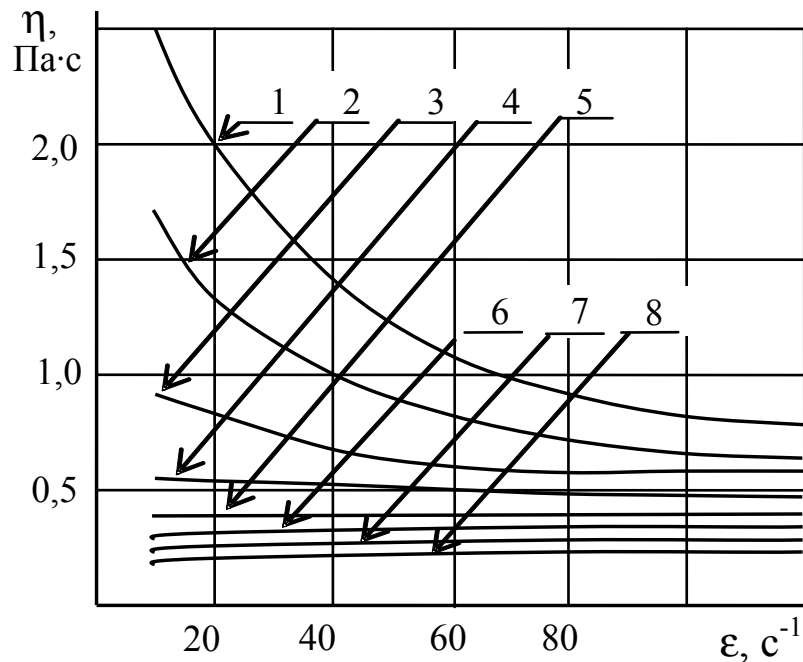
1, 2, 3, 4 – при скорости сдвига  $\epsilon = 10, 40, 80, 100 \text{ c}^{-1}$

Рис. 2 – Зависимость касательного напряжения  $\tau$  от выхода летучих веществ  $V^{\text{daf}}$  в исходном угле и скорости сдвига  $\epsilon$

На рис. 3 приведены построенные по материалам экспериментальных исследований графики зависимостей вязкости от степени углефикации исходного продукта при различной скорости сдвига.

И в том и в другом случаях чѐтко просматривается зависимость реологических характеристик водоугольного топлива от степени углефикации исходного продукта.

Поскольку стандартная влажность водоугольного топлива (30–35 %) значительно превышает характерную для угольных шламов, используемых в качестве товарного продукта (17-20%), необходимость исследования влияния этого фактора на топочные характеристики ВУТ отпадает. Приоритетное значение в обеспечении топочных, реологических и седиментационных характеристик при посто-



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – ВУС на основе угля марок Д, Г, Ж, К, ОС, ПА, А соответственно.

Рис. 3 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига и степени метаморфизма исходного угля

янной заданной влажности ВУТ приобретает зольность. Влияние зольности и влаги на теплоту сгорания угля иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 4.

Влиянию зольности на характеристики водоугольного топлива было посвящено большое количество исследований, как в нашей стране так и за рубежом. 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.

Тем не менее, результаты этих исследований дают общее представление о закономерности изменения энергетического потенциала топлива в зависимости от его зольности.

Такие исследования были проведены специалистами итальянской фирмы «Снампроджетти» в процессе наладки опытно-промышленного трубопровода Белово-Новосибирск (Россия, Кузбасс). В качестве исходного продукта для приготовления водоугольного топлива был принят кузнецкий уголь марки ГД с зольностью на сухую массу  $A^d = 15,32; 12,68; 10,06; 7,43$  и  $4,79$  %. Анализ результа-

тов этих исследований показал, что в статических условиях водоугольное топливо при зольности исходного продукта  $A^d = 4,79\%$  полностью нестабильно. Стабильность ВУТ возрастает по мере увеличения зольности исходного угля, и снижается с её уменьшением.

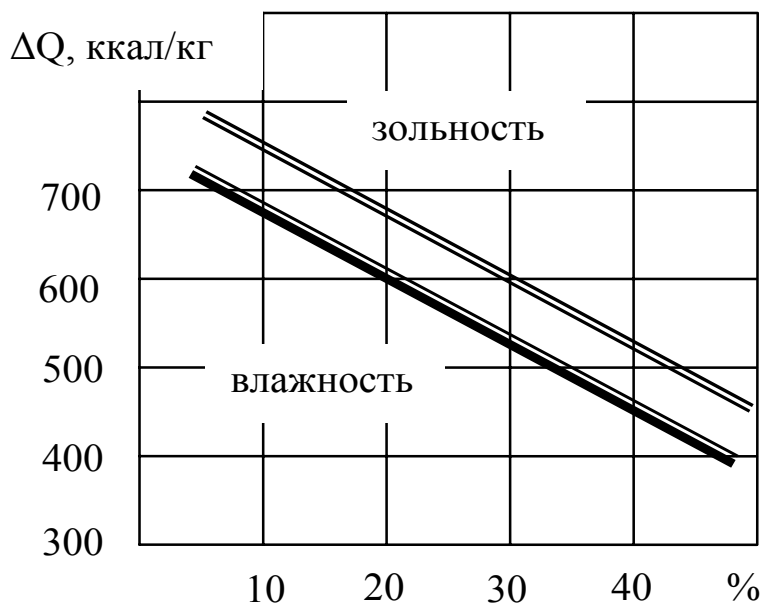


Рис. 4. Изменение теплоты сгорания угля марки ГР на каждые 10 % изменения зольности и влаги.

Динамическая стабильность водоугольного топлива с увеличением зольности снижалась. При снижении зольности  $A^d$  от 16 до 5 % время полной деградации ВУТ практически удваивается.

Специалистами НПО «Хаймек» (Власов Ю.Ф., Башкатова И.Н.) было приготовлено водоугольное топливо на базе антрацитового шлама зольностью  $A^d = 37,5\%$  с массовой концентрацией  $C = 62,8\%$  и эффективной вязкостью  $\eta = 0,82$  Па·с при градиенте скорости  $\dot{\epsilon} = 9$  с<sup>-1</sup>, остававшееся стабильным в течение 15 суток [1]. Там же было приготовлено ВУТ из шламов газовых углей с зольностью  $A^d = 42,86\%$  с массовой концентрацией  $C = 63,1\%$  и эффективной вязкостью  $\eta = 1,1$  Па·с при градиенте скорости  $\dot{\epsilon} = 9$  с<sup>-1</sup>, стабильное в течение 10 суток.

Из литературы [4] известны случаи приготовления водоугольного топлива с зольностью 1,7 % для использования, в частности, в качестве дизельного топлива. Стабилизирующей добавкой при этом была принята смола ксантана. Данных о седиментационной стабильности такого ВУТ не приводится. Однако, известно, что перевозка его осуществлялась в цистернах со струйными перемешивателями, а хранение — в танках с тихоходными мешалками.

В исследованном интервале при градиенте скорости  $\dot{\epsilon} = 11$  с<sup>-1</sup> эффективная вязкость  $\eta$  снижается с 1,02 до 0,54 Па·с. В тех же условиях показатель степени отклонения поведения ВУТ от ньютоновской жидкости изменяется от 0,54 до 1,15. При зольности  $A^d = 10-15\%$  ВУТ ведёт себя, как дилатантная жидкость.

Динамическая ста-

Несколько иной подход при оценке влияния зольности на реологию водоугольных суспензий был принят в исследованиях В.И. Мурко [3]. Водоугольная суспензия рассматривается, как сложная система, состоящая из стабилизированной дисперсной системы (СДС), т.е. жидкой фазы, включающей тонкоизмельченные твердые частицы ( $< 5$  мкм со средним размером  $d_d$ ), представленные в основном минеральными составляющими угля и более крупных частиц его органической части.

В результате исследований установлено, что при мокром диспергировании исходного продукта с минеральными легкоразмокаемыми включениями скорость измельчения существенно зависит от крупности и зольности угля. Это обстоятельство говорит в пользу использования в качестве исходного продукта для приготовления ВУТ угольных шламов, а также измельчения в одну стадию, энергоемкость которого более чем в 2,4 раза меньше двухстадийного. При этом, однако, зольность угля не должна быть меньше  $A^d = 14$  %. В процессе исследований была опробована с хорошими результатами технология приготовления ВУТ на основе отходов обогащения угля на ЦОФ «Шахтерская» (о-в Сахалин, Россия).

Осложняющим обстоятельством для использования при приготовлении ВУТ является высокая зольность и, следовательно, недостаточно высокий энергетический потенциал, а также недостаточная реактивность угольных шламов по отношению к кислороду воздуха. Препятствие это может быть преодолено либо дообогащением шламов до приемлемой зольности, либо использованием в качестве жидкой фазы ВУТ жидких горючих отходов, располагающих собственным энергетическим потенциалом, либо организацией совместного сжигания ВУТ с газообразными отходами коксохимического, нефтехимического и доменного производства, а также шахтным газом – метаном. Кроме огромного экологического выигрыша использование горючих жидких и газообразных отходов позволит получить дополнительный источник дешевых энергоносителей.

Приготовление водоугольного топлива на основе обводненного тонкодиспергированного угля позволяет отказаться от сушки и в то же время устраняет технологические проблемы мокрой угольной мелочи, возникающие у конечного потребителя. Более того, использование подобной ВУТ в качестве котельного топлива превращает угольную мелочь из помехи в источник доходов. В этом плане большую перспективу получает технология совместного сжигания (“со-



firing”) ВУТ пониженной концентрации с энергоносителями более высокой теплотворной способности и реактивности по отношению к кислороду воздуха и, в первую очередь, угольной пылью с целью снижения стоимости тепловой и электрической энергии, повышения степени выгорания органики и снижения выбросов окислов азота.

В малой теплоэнергетике такое водоугольное топливо как основное топливо достаточно эффективно может быть использовано в котлах малой и средней паропроизводительности, особенно в топках слоевого сжигания. Эколого-экономический эффект в этом случае может быть весьма значительным. Так например, перевод на водоугольное топливо трех городских котельных, укомплектованных котлами ДКВР 10-13 и КЕ 25-14, работающих на угольном концентрате марки ДГ может обеспечить:

- снижение расхода топлива на производство тепловой энергии в 1,3-1,7 раза;
- снижение стоимости 1 Гкал тепловой энергии 5,35-5,97 у.е.;
- снижение годовой стоимости топлива более чем на 600 000 у.е.
- снижение годового экономического ущерба более чем на 180 000 у.е.

### **Выводы.**

1. Отходы углеобогащения – высокозольные угольные и антрацитовые шламы являются дополнительным источником дешевых энергоносителей. Наиболее приемлемой технологией их утилизации является приготовление и использование водоугольного топлива.

2. Исходным продуктом для приготовления водоугольного топлива могут быть как угольные и антрацитовые шламы, отобранные непосредственно из технологической линии обогатительной фабрики, так и из действующих и законсервированных шламонакопителей в естественном виде или после повторного обогащения.

3. Водоугольное топливо наибольшей концентрации с наибольшим энергетическим потенциалом получают на основе антрацитовых шламов.

4. Наибольший эффект от использования водоугольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения, в теплоэнергетике получают от сжигания в качестве дожигового топлива в пылеугольных котлах либо совместного сжигания с природным газом или мазутом в газомазутных.

Список источников.

1. Круть А.А. Высокозольные угольные шламы – дополнительный источник энергоносителей // Зб. наукових праць ДонНТУ, сер. Електротехніка та енергетика.– № 21.– 2001.–с. 34.
2. Білецький В.С., Круть О.А., Світлий Ю.Г. Утилізація вугільних шламів шляхом виготовлення водо вугільного палива // Збугачення корисних копалин, вип.. 24 (65).– Дніпропетровськ.–2005.–с. 111-118.
3. Мурко В. И. Научные основы процессов подлучения и эф-фективного применения водоугольных суспензий: Автореферат диссертации доктора технических наук: 05.17.07 / Ин-т горючих ископаемых.–М.–1999.–с.48.
4. Benedec K.R. et.al. Coal-Fueled Diesels for Modular Power Generation- Operating Experience with 1,7 % Ash Coal-Water Slurry // The Proceeding of the 20-th {International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems.–1995.–USA.–p. 721-723.
5. Курченко И.П., Золотко А.А. Состояние, проблемы и перспективы развития обогащения углей в Украине. // Сб. Обогащениe полезных ископаемых, вып. 20 (61) Днепропетровск.–2004.

Стаття надійшла до редколегії 16.09.2009

Рецензент: докт. техн. наук, проф. А. П. Кононенко

**О.А.Круть, Л.М.Козыряцкий.** *Водовугільне паливо на основі вугільних шламів. Показано, що необхідність пошуку додаткових джерел дешевих енергоносіїв у сукупності з жорсткістю вимог екологічної безпеки стимулюють інтенсифікацію промислового використання відходів вуглезбагачення - високозольних вугільних й антрацитових шламів, найбільш ефективною технологією утилізації яких є готування водовугільного палива для використання в теплоенергетиці.*

**паливо, водовугільне, шлам, високозольний, утилізація, виготовлення, теплоенергетика**

**A.Krut, L.Kozyrjatskyi.** *Coal Slurries Water-Coal Fuel. It has been shown that the need for additional sources of cheap energy and high environmental safety requirements lead to a wider industrial use of coal waste (high-ash slurry coal). The most effective method of utilizing this waste is the production of fuel for the purposes of heat and power industry.*

**fuel, coal-water, slurries, high-ash, recovery, formulation, heat power industry**

© А. А. Круть, Л. Н. Козыряцкий, 2009