

УДК 622.693.4

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

ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО С УГОЛЬНОЙ ПЫЛЬЮ - ЗАМЕНИТЕЛЬ МАЗУТА И ПРИРОДНОГО ГАЗА

Показано, что использование высокозольных шламов для изготовления водоугольного топлива в сочетании с угольной пылью является эффективным заменителем мазута и природного газа.

шлам, водоугольное топливо, пыль, уголь, суспензия, зольность, вязкость, технология, сжигание

Проблема и её связь с практическими и научными задачами.

Высокая эффективность трубопроводного транспорта природного газа и нефтепродуктов, стройматериалов и отходов обогащения стимулировала в середине прошлого века развитие гидравлического транспорта угля. Препятствием к широкому внедрению такой технологии явилось то обстоятельство, что в процессе транспортирования особенно на большие расстояния уголь измельчался с образованием большого количества мельчайших классов. Конечный продукт магистрального гидротранспорта угля представляет собою водоугольную суспензию, обезвоживать которую и технически непросто и экономически нецелесообразно. Решение проблемы было найдено в прямом сжигании водоугольной суспензии в топках печей и котлов наподобие мазута. Было создано несколько экспериментальных установок, где сжигание водоугольной суспензии подтвердило перспективность технологии и определило направления её совершенствования.

Вновь внимание мировой научной общественности обратилось к технологии сжигания водоугольных суспензий во время топливного кризиса семидесятых годов прошлого века. Теперь, однако, эта технология рассматривалась уже как альтернатива природному газу и жидким нефтепродуктам, композиционное искусственное жидкое топливо. Технология существенно усложнилась необходимостью измельчения исходного продукта до особого бимодального гранулометрического состава и применения специальных химических добавок -пластификаторов, десульфуризаторов и т. п. Испытания по сжиганию водоугольного топлива на пилотных полупромышленных ус-

тановках подтвердили более высокую по сравнению с сжиганием угольной пыли степень выгорания органики и значительно более низкое содержание твердых частиц и газообразных вредных веществ, в частности окислов азота, в атмосферных выбросах.

Современное состояние вопроса. В настоящее время в технологии водоугольного топлива заинтересованы в первую очередь страны, которые не имея собственных запасов природного газа и нефти, стремятся выйти из экономической зависимости от иностранных поставщиков. Мировым лидером по промышленному внедрению технологии водоугольного топлива является Китай, где его приготавливают до 15 млн. т в год, сжигают на тепловых электростанциях, а также транспортируют танкерами в Японию. В некоторых развитых странах и, в частности в США, где многочисленные действующие и законсервированные накопители отходов обогащения создают экологическую угрозу, отходы обогащения используют как исходный материал для приготовления ВУТ, которое используют в теплоэнергетике как дожиговое топливо для повышения степени выгорания органики и снижения выбросов окислов азота.

Повышенное потребление угля, как основного энергоносителя, в условиях развивающейся экономики Украины предусматривает увеличение его добычи, что, в свою очередь, требует коренной реконструкции и строительства новых угольных шахт, а, следовательно, существенных капиталовложений и продолжительного времени. В этих условиях высокозольные отходы обогащения можно рассматривать как дополнительные дешевые энергоносители. А наиболее эффективной технологией использования угольных шламов является приготовление на их основе водоугольного топлива.

Постановка задачи. Факторами, определяющими характеристики водоугольного топлива, с одной стороны являются свойства исходного продукта, а с другой - особенности технологии приготовления. Если технология приготовления ВУТ является управляемым процессом, то изменение свойств исходного материала вызывает определенные технические трудности и экономически не всегда целесообразно. Если не принимать во внимание влажность угольных шламов, то основными их характеристиками являются степень углефикации угля, характеризующаяся выходом летучих веществ на сухую беззольную массу, и зольность.

Рассматривать их влияние на качество конечного продукта технологии нужно как каждого в отдельности, так и в совокупности.

Изложение материала и результаты. Угли разных марок и антрациты, а также их шламы, высокозольные отсеивы и штыбы, тонкодисперсные отходы углеобогащения, которые используют в качестве исходного продукта для приготовления водоугольного топлива, отличаются существенное разнообразие физических и физико-химических свойств, которые обусловлены в первую очередь, метаморфическими преобразованиями.

С возрастанием степени метаморфизма увеличивается содержание углерода и плотность органической массы угля, заметно снижается выход летучих веществ, определенным образом меняется чередование гидрофильных и гидрофобных участков, что оказывает существенное влияние на состояние и характер течения концентрированных суспензий. На рис. 1 приведены графики зависимости касательного напряжения от скорости сдвига для водоугольных суспензий массовой концентрации $C = 65\%$, изготовленных на основании углей всего ряда метаморфизма от длиннопламенного до антрацита зольностью на сухую массу $A^d = 10\%$.

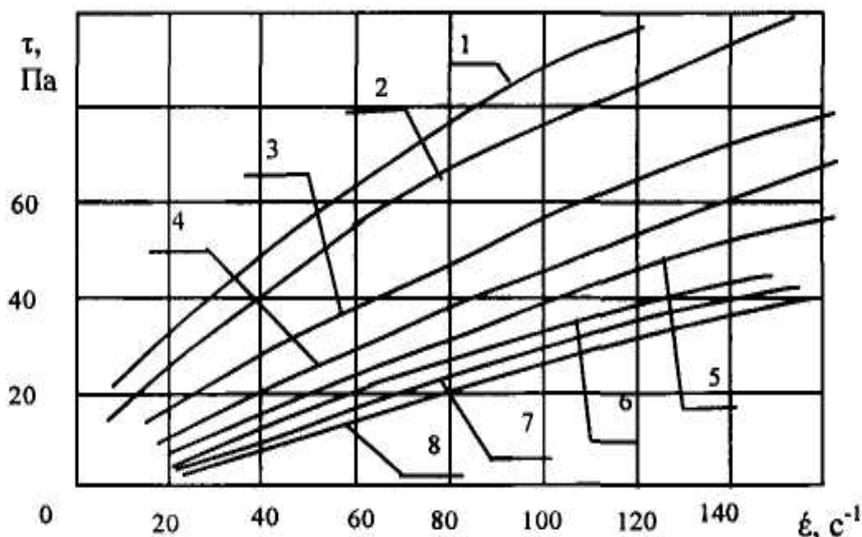


Рис. 1 - Зависимость касательного напряжения от скорости сдвига водоугольных суспензий из угля разных марок: 1,2,3,4,5,6,7,8 - водоугольные суспензии на основе угля марок Д, Г, Ж, К, ОС, Т, ПА, А - соответственно

Приведенные данные иллюстрируют снижение величины касательного напряжения при одинаковой скорости сдвига по мере повышения степени метаморфизма исходного продукта. Наименьшие касательные напряжения характерны для ВУС из углей марок Т, ПА и А (кривые 6, 7, 8), а максимальные - для суспензий на основе углей начальной стадии метаморфизма. Эту закономерность подтверждают также данные, приведенные на рис. 2, которые иллюстрируют зави-

симось касательных напряжений от выхода летучих веществ и скорости сдвига. На рисунке также обозначены марки угля - исходного продукта суспензий, которым соответствуют данные наблюдений.

Касательные напряжения возрастают с увеличением выхода летучих веществ в большей степени при большей скорости сдвига. Так, например, при скорости сдвига 10 с^{-1} и увеличении выхода летучих веществ с 6,5 % (антрацит) до 44 % (длиннопламенный уголь) касательное напряжение сдвига увеличивается в 13,5 раз, а при скорости сдвига 120 с^{-1} только в 3,34 раза (кривые 1 и 4).

Зависимость эффективной вязкости водоугольной суспензии от скорости сдвига и степени метаморфизма исходного угля приведена на рис. 3. Приведенные на рис. 2 и рис. 3 зависимости $\tau = f[\dot{\epsilon}, V^{daf})$ и $\eta = f(\dot{\epsilon}, F^{daf})$ в достаточной мере четко отображают режим течения водоугольной суспензии в диапазоне индекса течения $1 \leq n \leq 1$.

Статистическая обработка экспериментальных данных с использованием степенной зависимости Освальда-Рейнера $\tau = k \cdot \dot{\epsilon}^n$ дала возможность получить эмпирические зависимости касательных напряжений τ от скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ при течении водоугольных суспензий, приготовленных на основе углей разных марок (рис. 4).

$$\tau_A = 0,164 \dot{\epsilon}^{1,083}; \quad (1)$$

$$\tau_{ПА} = 0,200 \dot{\epsilon}^{1,623}; \quad (2)$$

$$\tau_T = 0,245 \dot{\epsilon}^{1,014}; \quad (3)$$

$$\tau_{OC} = 0,515 \dot{\epsilon}^{0,925}; \quad (4)$$

$$\tau_K = 0,759 \dot{\epsilon}^{0,856}; \quad (5)$$

$$\tau_{Ж} = 1,470 \dot{\epsilon}^{0,759}; \quad (6)$$

$$\tau_{Г} = 3,920 \dot{\epsilon}^{0,635}; \quad (7)$$

$$\tau_{Д} = 6,60 \dot{\epsilon}^{0,566}; \quad (8)$$

В уравнениях (1) - (8) индексы при символах, которые обозначают касательные напряжения сдвига τ , соответствуют исходному углю соответствующей водоугольной суспензии.

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о том, что по мере увеличения выхода летучих веществ индекс консистентности k увеличивается от 0,164 до 6,6, а индекс течения n уменьшается от 1,083 до 0,556.

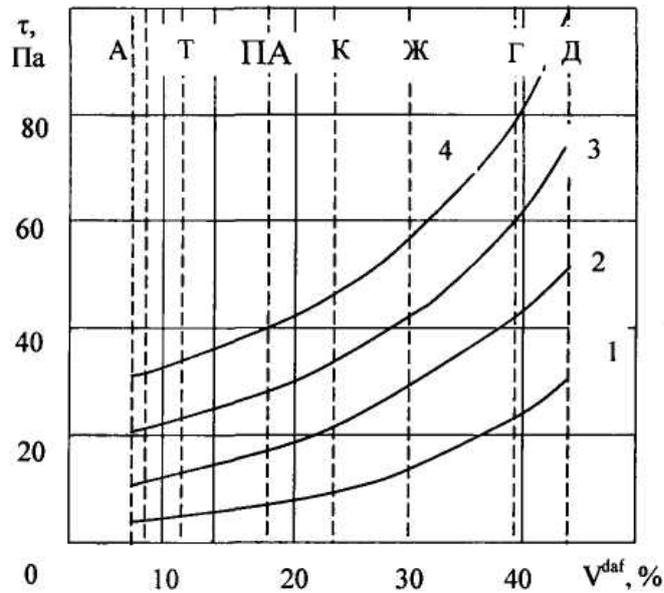


Рис. 2 - Зависимость касательных напряжений от выхода летучих веществ и скорости сдвига: 1, 2, 3, 4 - при скорости сдвига 10, 40, 80, 100 с⁻¹

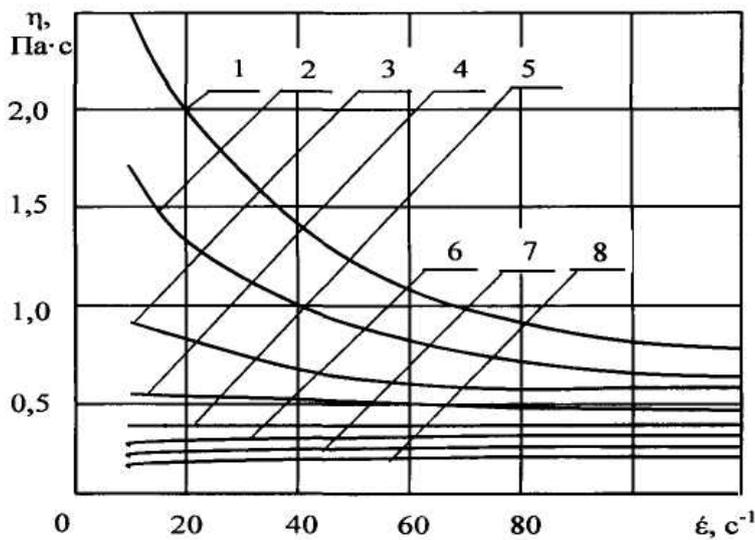


Рис. 3 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига и степени метаморфизма исходного угля: 1,2,3,4,5,6,7,8 – водоугольные суспензии на основе угля марок Д,Г,Ж, К, ОС, Т, ПА, А, соответственно

Эмпирические зависимости для определения k и n представлены в таком виде:

$$k = 0,0609e^{0.1052V^{daf}}; \tag{9}$$

$$n = 1,18 - 0,014 V^{daf}; \tag{10}$$

Таким образом, в общем виде зависимость касательного напряжения от выхода летучих веществ можно выразить как

$$\tau = 0,0609 \cdot e^{0,1052 V_{daf}} \cdot \dot{\epsilon}^{1,18-0,014 V_{daf}} \quad (11)$$

Уменьшение k и увеличение n свидетельствует о том, что по своему состоянию водоугольная суспензия приближается к ньютоновской жидкости, что может быть обусловлено снижением содержания угля в суспензии и его зольности или высокой степенью метаморфизма исходного продукта.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные зависимости касательных напряжений от массовой концентрации водоугольного топлива, приготовленного на основе углей всего ряда метаморфизма. Пунктирной линией показана величина максимальной возможной концентрации при сохранении удовлетворительных реологических и седиментационных характеристик.

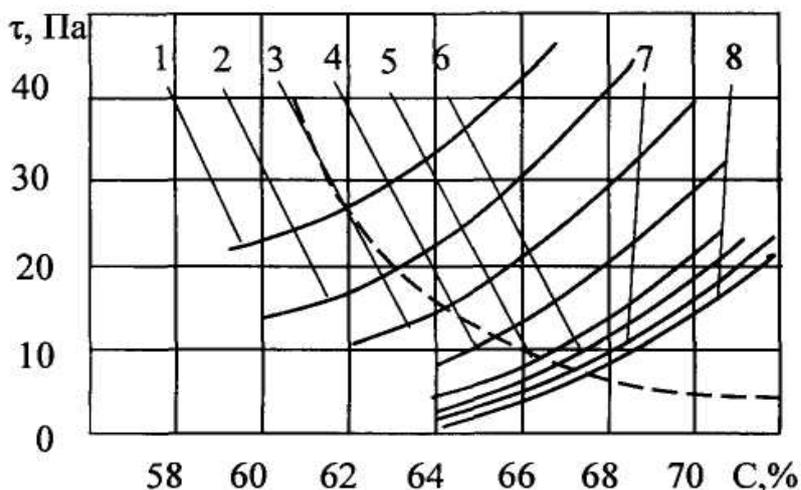


Рис. 4 - Зависимость касательного напряжения от массовой концентрации водоугольных суспензий при градиенте скорости $\dot{\epsilon} = 17-20 \text{ с}^{-1}$: 1,2,3,4,5,6,7,8 - исходный уголь суспензий марок Д, Г, Ж, К, ОС, Т, ПА, А соответственно.

Одним из основных факторов, определяющих характеристики водоугольного топлива, является зольность исходного продукта.

Графики, иллюстрирующие зависимость касательных напряжений и эффективной вязкости при течении водоугольных суспензий на основе обогащенного антрацита и антрацитового штыба приведены на рис. 5. Анализ приведенных на рисунке данных указывает на существенную зависимость режима течения водоугольных суспензий от зольности исходного продукта и массовой концентрации.

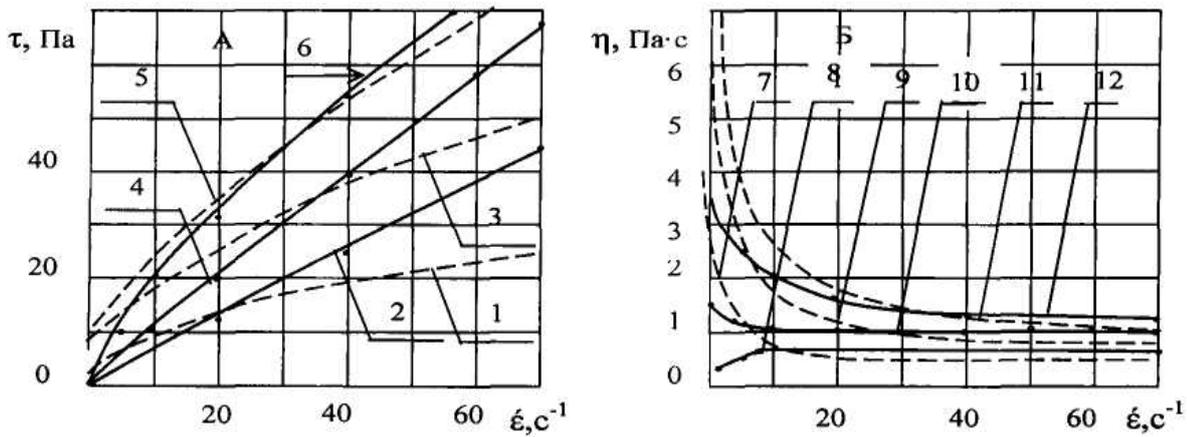


Рис. 5 - Зависимость касательного напряжения (А) и эффективной вязкости (Б) от скорости сдвига: 1,3,5,7,9,11 – концентрация 62, 64, 66 %; 2,4,6,8,10,12 – концентрация 65,7; 68,7; 70 %; ВУС на основе антрацитовых шламов; ВУС на основе обогащенного антрацита

Кривые течения $\tau = f(\dot{\epsilon}, C)$ та $\eta = f(\dot{\epsilon}, C)$, при концентрациях 65,7; 68,7; 70,0 % проявляют признаки дилатантности ньютоновського течения и псевдопластичности, соответственно. Что касается суспензий, приготовленных на основе антрацитовых шламов, то в диапазоне концентраций 62-66 % их характеристики имеют признаки близкие к псевдопластикам.

Высокая зольность угольных шламов используемых в качестве дополнительных дешёвых энергоносителей, а, следовательно, их низкий энергетический потенциал, послужили стимулом к разработке технологии совместного сжигания водоугольного топлива, приготовленного на основе отходов обогащения, с основным штатным топливом (в англоязычной литературе - технология «co-firing») и, в первую очередь, с угольной пылью.

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

- отсутствие необходимости в обеспечении 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 % от подводимой тепловой энергии: стабильность факела обеспечивается сжиганием основного топлива - угольной пыли;

- гранулометрический состав исходного для приготовления ВУТ угля не имеет решающего значения, при его пониженной концентрации; величина вязкости при этом должна, однако, выдерживаться в пределах до 1,0-1,2 Па·с;

- зольность исходного угля не вызывает серьёзных проблем в плане образования и удаления очаговых остатков, поскольку пылеугольные котлоагрегаты изначально оборудованы системами гидрозолоудаления; тем не менее, однако, желательно, чтобы зольность ВУТ не превышали зольности основного топлива.

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

Привлекательность технологии «co-firing» по отношению к ВУТ на основе отходов обогащения и пылевидному углю подтверждается анализом технологических вариантов его использования в качестве добавок к основному топливу. При этом в необходимых случаях возникает проблема вторичного обогащения шламов, что кроме всего прочего, 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.

Выводы и направления дальнейших исследований. Как показывает опыт мировой практики, весьма эффективным является сжигание водоугольного топлива совместно 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 и экологической чистоты.

В свете изложенного 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. Ещё более интересным представляется сжигание угольных шламов коксующихся углей совместно с коксовым газом. В этом случае и то, и другое топливо являются отходами производства.

В дальнейшем необходимо проводить исследования по эффективному извлечению шламов из шламонакопителей с помощью эрлифтно-землерядных комплексов [5], которые, на наш взгляд, являются наиболее перспективными средствами добычи и гидротранспорта шлама к обогатительным фабрикам.

Список источников:

1. Білецький В.С. Утилізація вугільних шламів шляхом виготовлення водовугільного палива / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Г. Світлий // Збагачення корисних копалин. – 2005. – Вип. 24 (65). – С. 111-118.
2. Білецький В.С. Реологічні характеристики водовугільних суспензій у залежності від якості вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Вісник Криворізького технічного університету. – 2006. – Вип. 11. – С. 49-55.
3. Білецький В.С. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – №6. – С. 46-49
4. Покровская В.Н. Пути повышения эффективности гидротранспорта / В.Н. Покровская. – М. – Недра, 1972. - С. 161.
5. Бойко М.Г. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди: навчальний посібник / М.Г. Бойко, Л.М. Козиряцький, А.П. Кононенко. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. - С. 2996

Стаття надійшла до редколегії 19.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. ЕМС А.П.Кононенко

А.А.Круть, Ф.О.Папаяні, Л.М.Козиряцький. Водовугільне паливо з вугільним пилом – замітник мазуту і природного газу. Показано, що використання високозольного шламу для виготовлення водовугільного палива в поєднанні з вугільним пилом є ефективним замітником мазуту і природного газу.

шлам, водовугільне паливо, пил, вугіль, суспензія, зольність, в'язкість, технологія, спалювання.

A.Crut, Ph.Papayani, L.Kozyryatsky. Water-coal fuel with coal dust – a substitute for fuel oil and natural gas. Shown that the use of high-sludge for production of coal-water fuel in conjunction with the coal dust is an effective substitute for oil and natural gas.

slime, water-coal fuel, dust, coal, suspension, ash level, viscosity, technology, combustion.

© Круть А.А., Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., 2011