

УДК 697.32

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ЕГО РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Остапенко В.Н., Мирошникова М.В.

## RESEARCH INFLUENCE GRANULOMETRIC COMPOSITION WATER-COAL FUEL TO RHEOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS

Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Ostapenko V., Miroshnykova M.

*В статье было установлено, что сложность получения водоугольного топлива (ВУТ) заключается в упрочнении пространственной структурной сетки, образованной частицами угля, по мере возрастания концентрации твердой фазы. Получение ВУТ с необходимыми технологическими свойствами возможно при достижении бимодального гранулометрического состава, а также при введении реагентов, создающих затруднение для коагуляции частиц угля и формировании электростатического барьера между частицами твердой фазы. Установлено, что бимодальность гранулометрического состава способствует снижению вязкости суспензии за счет роли мелкой фракции твердого компонента ВУТ. Определены реологические и гидродинамические характеристик ВУТ, изучены закономерности влияния гранулометрического состава твердого компонента ВУТ на его характеристики. Установлено, что наиболее перспективным направлением дальнейших исследований является применение полученного уравнения регрессии для определения сопротивления движению ВУТ трубопроводным транспортом по уравнению Букингама.*

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, эффективная вязкость, напряжение сдвига, концентрация, бимодальность, гранулометрический состав.

Введение. Современное топливо должно отвечать жестким требованиям современного рынка, таким как стабильные значения основных технологических характеристик, задаваемых потребителем, рентабельность производства и минимально возможное опасное экологическое воздействие на окружающую среду при его получении и использовании. Эффективное использование и переработка угля в энергетическое топливо напрямую связано с экологическими проблемами, которые при этом неизбежно возникают. Повышение энергоэффективности следует рассматривать в рамках угольно-энергетического комплекса по всем звеньям техно-

логической цепочки: добыча – переработка – производство и потребление энергии. Технологические процессы угольно-энергетического производства, дополняя друг друга, позволяют эффективно использовать природные ресурсы, создавать и применять безотходные, малоотходные и энергосберегающие технологии с учетом преимуществ оптимального производственного цикла.

Перспективным направлением, которое реализуется во многих странах, является разработка технологий получения и транспортирования высококонцентрированного водоугольного топлива (ВУТ) [1-3]. Разработка эффективных процессов получения и применения ВУТ должна базироваться на научно обоснованных методах физического и физико-химического воздействия на исходный уголь с учетом свойств его органической и минеральной составляющих [4].

**Постановка проблемы.** Сложность получения ВУТ заключается в упрочнении пространственной структурной сетки, образованной частицами угля, по мере возрастания концентрации твердой фазы, что препятствует реализации максимальной текучести при сохранении наименьшего значения эффективной вязкости ( $\eta=1-2$  Па·с при скорости сдвига  $D\dot{\gamma}\approx 9\text{с}^{-1}$ ). Естественно, что успешное решение одной из проблем неизбежно приводит к возникновению препятствий в решении остальных. Увеличение содержания твердой фазы в области критических значений характеризуется резким возрастанием вязкости и напряжения сдвига. С другой стороны высокое значение прочности, вязкости и особенно концентрации твердой фазы в жидкой среде способствует седиментационной устойчивости, то есть исключает опасность их расслоения, за счет создания стерического препятствия между частицами [5].

Исходя из методов регулирования реологических свойств высококонцентрированных дисперсных систем, получение ВУТ с необходимыми технологическими свойствами возможно при достижении бимодального гранулометрического состава, а также при введении реагентов, создающих стерическое затруднение для коагуляции частиц угля и формировании электростатического барьера между частицами твердой фазы [6].

Эффект бимодального гранулометрического состава обусловлен тем, что мелкие частицы угля размещаются между крупными частицами. Тем самым мелкие частицы вытесняют находящуюся в агрегатах воду, вследствие чего вязкость суспензии становится меньше, а степень наполнения дисперсной фазы больше [7]. Исходя из теории смазки [8], мелкие фракции угля выполняют роль элементов, которые заполняют поверхность крупной частицы, отделяют крупные частицы друг от друга, препятствуя непосредственному контакту крупномасштабных неровностей и способствуют ее перемещению в составе ВУТ с более низкими показателями сопротивления.

Поверхность угля является мозаичной, то есть имеет гидрофильные и гидрофобные участки. Поэтому, при выборе добавок для получения устойчивого и вместе с тем текучего ВУТ, необходимо учитывать эффективность их влияния на три основных физико-химических процесса: смачивание твердой поверхности, диспергирование твердой фазы во время механоактивации и стабилизацию системы. От этих факторов будет зависеть характер дисперсной структуры, ее реологические свойства, а также агрегативная и седиментационная устойчивость. Также имеет место применение различных добавок и реагентов, например технического лигносульфоната натрия (ЛСТ) и других, в качестве диспергирующего и пластифицирующего реагента для получения ВУТ на основе углей различной степени метаморфизма. Благодаря введению ЛСТ во время измельчения, в отличие от ВУТ полученных без добавки ЛСТ, значительно повышается концентрация дисперсной фазы ВУТ на основе исследованных марок угля, при сохранении вязкости до 1,5 Па·с [7].

В настоящее время большое внимание уделяется изучению электроповерхностных свойств дисперсных систем, которые позволяют получить необходимую информацию о вкладе электрического фактора в общий баланс энергии при контактных взаимодействиях частиц. Такая информация позволяет целенаправленно регулировать силу контактных взаимодействий между частицами, а, следовательно, управлять процессами структурообразования в дисперсных системах, к которым принадлежит ВУТ. Одним из параметров, который позволяет получить прямую информацию о состоянии двойного электрического слоя, который формируется на поверхности частиц угля, является электрокинетический потенциал ( $\zeta$ ).

Как метод физико-химического модифицирования поверхности механохимическая обработка угля в процессе измельчения позволяет в достаточно широких пределах влиять на структуру поверхностных слоев и химические свойства поверхности твердой фазы.

Характер механохимических процессов довольно специфический, а путь их течения зависит от комплекса свойств измельчаемого вещества, условий проведения диспергирования, дисперсионной среды и химической добавки. При диспергировании образуется принципиально новая поверхность, которая может стимулировать химические реакции [1,2]. Механохимическая активация угля может привести к изменению межмолекулярных связей, сопровождающаяся их ослаблением, а иногда вызывает механический разрыв химических связей и образования активных центров с повышенной реакционной способностью [9].

В процессе мокрого измельчения с участием химических добавок происходит механохимическая модификация угольных частиц. Молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ) адсорбируются на поверхности частиц угля, при этом уменьшается межфазная энергия сцепления и облегчается дезагрегация частиц. Кроме того, адсорбированный слой сглаживает микрошероховатость частиц, уменьшая коэффициент трения между ними. Создание одноименного электрического заряда на поверхности частиц твердой фазы в результате адсорбции добавок исключает возможность их сцепления благодаря электростатическим силам. Совокупность указанных процессов дает возможность снижать вязкость угольной суспензии и существенно увеличивать концентрацию твердой фазы при получении ВУТ.

Теоретической предпосылкой получения ВУТ с максимальной текучестью и высокой концентрацией дисперсной фазы при поддержании низкого уровня неньютоновской вязкости является знание основных параметров высококонцентрированных дисперсных систем, их критических значений и непосредственного влияния этих факторов на процессы структурообразования. В частности рост напряжения сдвига обусловлен не столько повышением концентрации высокодисперсной фазы, а в значительной степени соотношением крупных и мелких фракций.

Реализация оптимального гранулометрического состава для систем с  $D_0 \ll D_0, KP$  возможна только в условиях предельного разрушения структуры ( $P_0 \rightarrow 0$ ) или же при регулировании силы и энергии взаимодействия частиц таким образом, чтобы избежать образования устойчивых структур. В условиях сухого измельчения, частицы угля приобретают несферическую форму, а доля сильноанизотричных частиц возрастает. При мокром измельчении, особенно в сочетании с модификаторами поверхности, содержание анизотричных частиц, наоборот, уменьшается [10], что создает высокую концентрацию ВУТ.

Исследование электроповерхностных свойств дисперсных систем позволяет определить состояние и характеристики адсорбционных слоев химических реагентов непосредственно в реальных дисперсиях. Кроме того, они необходимы для получения информации о роли электрического фактора в общем балансе энергии при контакте взаимодействующих частиц. При адсорбции на поверхности угольных частиц химические добавки поддерживают частицы в суспензионном состоянии благодаря отталкивающему эффекту (электростатическое диспергирование).

Смачивание поверхности частиц угля сопровождается адсорбционными процессами. В присутствии модификаторов поверхности - ПАВ, полимеры, электролиты - процессы, происходящие в адсорбционном слое, характеризуются изменением в двойном электрическом слое (ДЭС).

Выделяют два основных механизма формирования поверхностного заряда коллоидных частиц. Первый связанный с адсорбцией ионов и ПАВ на поверхности частиц [11]. Во втором механизме заряд появляется в результате химических реакций, происходящих на границе раздела фаз. Для реализации заряда обычно используют поливалентные электролиты или ионогенные ПАВ.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что бимодальность гранулометрического состава способствует снижению вязкости суспензии за счет роли мелкой фракции твердого компонента ВУТ, которая способствует перемещению крупной фракции угля в составе ВУТ с более низкими показателями сопротивления.

С помощью методов коллоидной химии и физико-химической механики можно эффективно создавать высококонцентрированное водоугольное топливо на основе угля различных марок концентрацией до 75% [6], с необходимыми коллоидно-химическими свойствами. Конечный продукт готов к использованию в котлоагрегатах и не требует специальной подготовки перед сжиганием. Полученные реологические, электро-кинетические, адсорбционные, гранулометрические и теплотехнические характеристики позволили не только охарактеризовать процессы, происходящие на стадиях получения топлива, но и управлять ими в зависимости от технологического назначения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Фундаментальные исследования в области развития технологий приготовления и транспортирования ВУТ принадлежат таким известным ученым как: В. Е. Зайденварг, К. Н. Трубецкой, В. И. Мурко, И. Х. Нехороший. Особый вклад в развитие технологий водоугольного топлива внес Г. Н. Делягин.

При выполнении работы были проанализированы и исследованы разработки НПО ЦКТИ, ОПУ Белово-Новосибирск, ученых Н.С. Рассудова, В.В. Манцева и др. Основную веху исследования вопросов управления структурно-реологическими характеристиками ВУТ закрепил С.П. Костовецкий.

**Цель статьи.** В работе ставится задача улучшения способа управления реологическими свойствами при приготовлении ВУТ, что позволит получить требуемые параметры гранулометрического состава, минимизировать основной интегральный показатель - удельные потери напора при транспортировании.

**Результаты исследований.** Максимально возможная концентрация ВУТ с удовлетворительными реологическими и седиментационными характеристиками определяется гранулометрическим составом измельченного исходного продукта, а также применением диспергирующих и стабилизирующих химических добавок. При не контролируемом бимодальном гранулометрическом составе, приближающемся к составу максимальной упаковки, полученном в результате двухстадийного помола угля в шаровой мельнице, без применения химических добавок можно достичь массовой концентрации 56 % - 58 % при весьма неудовлетворительных реологических характеристиках (высокий уровень эффективной вязкости и напряжения сдвига) при неудовлетворительной агрегативной устойчивости и седиментационной стабильности. Снижение концентрации, тем более при повышенной зольности, снижает энергетический потенциал водоугольного топлива, что ставит под сомнение экономическую целесообразность его использования как котельного и печного топлива.

Следует учесть, что теория пластифицирующего и диспергирующего эффекта различных химических добавок в плане регулирования реологических характеристик высококонцентрированных дисперсных (особенно угольных) систем к настоящему времени разработана недостаточно, поэтому выбор их в каждом конкретном случае целесообразно осуществлять опытным путем.

Одной из основных операций в технологии приготовления водоугольного топлива является гомогенизация. Назначение аппаратов гомогенизаторов сводится к созданию квазигомогенной суспензии (дисперсии) тонко измельченного угля в воде с небольшим количеством химических добавок. При этом упорядоченное распределение (взаиморасположение) различных по крупности частиц (дискретной фазы) и сплошной жидкой диспергирующей среды должно обеспечить меньшую вязкость и гидравлические сопротивления в трубах по сравнению с суспензией, не прошедшей стадию гомогенизации [12].

Анализ исследований показал, что для приготовления ВУТ максимально возможной концентрации следует измельчать уголь до гранулометрического состава максимальной упаковки, который описывается формулой Альфреда [13,14].

Гранулометрическое распределение по формуле Альфреда предполагает наличие в угле от 5% до 20 % коллоидных частиц, крупность которых не превышает 0,003 мм, находящихся в дефлокулированном состоянии и препятствующих оседанию бо-

лее крупных частиц при движении потока в ламинарном режиме. В то же время, способствуя повышению текучести суспензий, коллоидные частицы требуют увеличения энергозатрат на их получение и увеличивают стоимость приготовления ВУТ. Совершенно очевидно, что на практике измельчить исходный уголь до такого гранулометрического распределения весьма затруднительно [15].

Исходя из этого обстоятельства, отечественными и зарубежными исследователями применительно к конкретным условиям приготовления и использования ВУТ были предложены различные модели гранулометрического состава измельченного угля, обеспечивающие максимальную упаковку и уплотнение [16,17]. Все эти модели обладают одним общим свойством – бимодальностью, которая достигается путём двухстадийного или одностадийного измельчения в различных мельницах; смешиванием в различных соотношениях крупных и мелких продуктов двух или нескольких помолов с одновременным удалением из общей совокупности одного или нескольких средних классов, однако отсутствует методология определения оптимального соотношения крупной и мелкой фазы твердого в ВУТ.

ВУТ состоит из частиц угля, помещенных в воду т.е. имеет корпускулярную природу. Очевидно, что увеличение объемной плотности приводит к увеличению числа контактов частиц, и как следствие увеличению суммы сил взаимодействия частиц, к тому же при плотном расположении частиц уменьшается подвижность всей совокупности частиц. Кроме того дальнейшее взаимодействие частиц не позволяет им сблизиться ближе расстояния дальней коагуляции. Необходимо оценить варианты, плотных и свободных упаковок с учетом фиксации частиц на расстоянии дальней коагуляции.

По мере уменьшения влажности увеличивается число контактов на поверхности крупной частицы, изменяется упаковка от свободной к плотной, что увеличит сопротивление сдвигу и как следствие вязкость ВУТ.

В работе были проведены экспериментальные исследования, целью которых является определение реологических и гидродинамических характеристик ВУТ, изучение закономерностей влияния гранулометрического состава твердого компонента ВУТ на его характеристики и получение уравнения регрессии для дальнейшего определения сопротивления движению ВУТ по трубопроводам на основе использования уравнения Букингама. Общий вид экспериментальной установки для исследования реологических и гидродинамических характеристик ВУТ представлен на рис.

Анализ существующих теоретических исследований и экспериментальных данных показывает, что наиболее важными факторами, влияющими на параметры гидротранспортирования водоугольного топлива являются концентрация твердого компонента (С) и параметры, характеризующие бимодаль-

ность гранулометрического состава твердой фазы ВУТ в качестве которых предложены:

$$\Gamma_1 = \frac{P_1}{P_2}; \Gamma_2 = \frac{P_3}{P_2}$$

где  $P_1$  - доля частиц мелкой фракции, %;

$P_2$  - доля частиц промежуточной фракции, %;

$P_3$  - доля частиц крупной фракции, %.

Что позволяет в полной мере определить бимодальность гранулометрического состава. В работе были исследованы три варианта массовой концентрации твердого компонента (С=60,62,62%) угля марки А, а также параметр  $\Gamma_1$  который выражает отношение мелкой фракции угля к его промежуточной фракции по массе и по диаметру частиц и параметр  $\Gamma_2$  который выражает отношение крупной фракции к промежуточной соответственно. Использование данных параметров позволяет наиболее точно оценить влияние гранулометрического состава твердого компонента ВУТ на его реологические и гидродинамические характеристики.



Рис. Экспериментальная установка для исследования реологических и гидродинамических характеристик ВУТ

Как показал анализ существующих методов определения удельного гидравлического сопротивления ВУТ (например, классической формулы Букингама) необходимо иметь данные о эффективной вязкости и напряжении сдвига в широком диапазоне гранулометрического состава ВУТ.

В связи с этим для определения основных реологических характеристик водоугольного топлива, а именно эффективной вязкости и предельного напряжения сдвига, была использована методика планирования эксперимента. Выбранная матрица планирования эксперимента является планом, особенностью которого является расчет уравнения квадратики на ортогональном планировании равноотстоящих узлов. При этом матрица планирования эксперимента содержит полный трехфакторный план.

Для упрощения записи плана эксперимента и обработки опытных данных натуральные значения факторов были кодированы с помощью преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где  $x_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;  
 $\tilde{x}_i$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;  
 $x_{i0}$  – основной уровень (натуральный)  $i$ -го фактора;  
 $\Delta x_i$  – интервал варьирования (натуральный)  $i$ -го фактора.

Уравнение регрессии для плана выбранного типа запишется в виде

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3$$

где  $a_0$  – свободный коэффициент уравнения регрессии;  
 $a_i$  – коэффициент при линейных составляющих уравнения регрессии;  
 $a_{ij}$  – коэффициент при смешанной комбинации факторов эксперимента;

Значения неизвестных коэффициентов квадратики  $a_{ij}$  получены по формуле

$$a_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^8 y_i}{8},$$

где  $y_i$  – экспериментальные данные параметров вязкости и напряжения сдвига.

Погрешности результатов экспериментов для каждой из серий опытов согласно матрице планирования оценивались по методике [18].

Проанализировав экспериментальные данные гранулометрического распределения исходного угля и проведя оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии были исключены незначимые члены уравнения [19,20]. В связи с этим уравнения регрессии для выбранной матрицы планирования запишутся в виде кодированных параметров:

$$y(\eta) = 0,518 + 0,0744x_1 + 0,0465x_2 + 0,0369x_3 + 0,00263x_1x_2 - 0,00513x_1x_3 + 0,00363x_2x_3 - 0,00438x_1x_2x_3$$

$$y(\tau_0) = 6,236 + 2,61x_1 + 1,064x_2 + 0,826x_3 + 0,159x_1x_2 + 0,846x_1x_3$$

где  $y(\eta)$  – эффективная вязкость ВУТ;

$y(\tau_0)$  – предельное напряжение при сдвиге ВУТ.

На основании полученных результатов были определены значения реологических параметров ВУТ, эффективной вязкости и предельного напряжения сдвига для трех вариантов концентраций твердого компонента. Оптимальным гранулометри-

ческим составом угля, позволяющим получить водоугольное топливо с высокой степенью насыщения, обладающее сравнительно высокой стабильностью реологических характеристик, седиментационной и агрегативной устойчивостью и обеспечивающее беспрепятственное его прохождение через каналы и отверстия форсунок при подаче топливной системы на сжигание, является гранулометрический состав, при котором значения  $\eta$  составляют 0,38, 0,44 и 0,53 Па с, для концентраций 60, 62 и 65% соответственно. Значения  $\tau_0$  при этом составили 3,0, 4,51 и 6,76 соответственно.

В дальнейших исследованиях для описания зависимости расхода ВУТ от действующего перепада давлений предлагается использовать полное уравнение Букингама, которое определяет зависимость между гидравлическим уклоном и объемным расходом [21,22].

**Вывод.** На основании проведенного анализа было установлено, что сложность получения ВУТ заключается в упрочнении пространственной структурной сетки, образованной частицами угля, по мере возрастания концентрации твердой фазы, что препятствует реализации максимальной текучести при сохранении наименьшего значения эффективной вязкости. Исходя из методов регулирования реологических свойств высококонцентрированных дисперсных систем, получение ВУТ с необходимыми технологическими свойствами возможно при достижении бимодального гранулометрического состава, а также при введении реагентов, создающих затруднение для коагуляции частиц угля и формировании электростатического барьера между частицами твердой фазы.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что бимодальность гранулометрического состава способствует снижению вязкости суспензии за счет роли мелкой фракции твердого компонента ВУТ, которая способствует перемещению крупной фракции угля в составе ВУТ с более низкими показателями сопротивления. Установлено, что с помощью методов коллоидной химии и физико-химической механики можно эффективно создавать высококонцентрированное водоугольное топливо на основе угля различных марок концентрацией до 75% с необходимыми коллоидно-химическими свойствами. Анализ исследований показал, что для приготовления ВУТ максимально возможной концентрации следует измельчать уголь до гранулометрического состава максимальной упаковки, который описывается формулой Альфреда.

В результате проведения экспериментальных исследований были определены реологические и гидродинамические характеристики ВУТ, изучены закономерности влияния гранулометрического состава твердого компонента ВУТ на его характеристики. В работе было установлено, что наиболее перспективным направлением дальнейших исследований является применение полученного уравнения регрессии для определения сопротивления движе-

нию ВУТ трубопроводним транспортом по уравнению Букингама.

#### Л и т е р а т у р а

1. Макаров А.С., Кобітович О.М., Савицький Д.П., Егурнов О.І. Колоїдно-хімічні методи отримання палива на основі відходів вуглезбагачення // Вісник НАН України. – 2009. - №1. – С.56-67.
2. Савицький Д.П., Макаров А.С., Завгородний В.А. Реологические свойства водоугольных суспензий на основе бурых углей в присутствии натриевых лигно-сульфонатов и щелочи // Химия твердого топлива. – 2009. - №5. – С.73–77.
3. Макарова К.В., Савицький Д.П., Макаров А.С., Егурнов А.І. Водоугольное топливо на основе антрацита // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №5. – С. 3–5.
4. Mosa E.S., Saleh A.M., Taha T.A. Effect of chemical additives on flow characteristics of coal slurries // Physicochemical Problems of mineral Processing. – 2008. – Vol. 42. – P.107–118.
5. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия., 1980. – 320с.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Российский химический журнал. – 2003. Т.47. - №2. – С.33–44.
7. Keat-Teong Lee, Kok-Chong Tan, Irvan Dahlan, Abdul Rahman Mohamed. Development of kinetic model for the reaction between SO<sub>2</sub>/NO and coal fly ash/ CaO/CaSO<sub>4</sub> sorbent // Fuel. — 2008. — Vol. 87. — P. 23–28.
8. Камерон Алистер. Теория смазки в инженерном деле [Текст] / Перевод с англ. инж. В. А. Бородин; Под ред. д-ра техн. наук В. К. Житомирского. - Москва : Машгиз, 1962. - 296 с.
9. Хренкова Т.М. Механохимическая активация углей. — М., 1993.
10. Олофинский Е.П. Исследования гидромеханики трубопроводного транспортирования суспензии // Исследования гидромеханики суспензий в трубопроводном транспорте. — М.: ВНИИПИгидротрубопровод, 1985. — С. 4–8.
11. Pearson J.T. Hydrotropic and Adsorption Properties of Some Bis — Quaternary Ammonium Compounds and Related Cationic surfactants // J. Colloid and Interface Sci. — 1971. — Vol. 37. — №3. — P. 509–520.
12. Круть О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
13. Білецький В.С. Перспективи впровадження технології водовугільного палива у малій теплоенергетиці України / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Г. Світлий // Форум гірників: матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 177 – 180.
14. Круть А.А. Высокозольные угольные шламы – дополнительный источник энергоносителей / А.А. Круть // 36. научных праць ДНТУ: серія електротехніка та енергетика.– 2001.– № 21.– С. 34 – 37.
15. Helle G., Nygaard B, Søren Kiilb, Johnssonb Jan E., Jørgen N. Jensenb, Jørn Hansenb, Folmer Foghbc, Kim Dam-Johansenb. Full-scale measurements of SO<sub>2</sub> gas phase concentrations and slurry compositions in a wet flue gas desulphurisation spray absorber // Fuel. — 2004. — Vol. 83. — p. 151–164.
16. Fu Xiao-an. A New Kind of Light Fuel Composed of Water/-Coal /Hydrocarbon / Xiao-an Fu [et al.] // The Proceedings of the 21st International Technical Conference

on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 259 – 266.

17. Huettenhain Horst. Premium Coal-Water Fuel (CWF) / Horst Huettenhain, M.V. Chari // The Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – p. 1099 – 1108.
18. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издательство “Наука”, Москва 1976, 279с.
19. Longlian Cui, Liqian An, Hejin Jiang. A novel process for preparation of an ultra-clean superfine coal-oil slurry // Fuel. — 2007. — Vol. 83. — P. 1016.
20. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. Теоретические основы химии угля. — М.: Изд-во МГУ, 2003. — 524 с.
21. Рабинович Е.З. Гидравлика: учебное пособие для вузов / Е.З. Рабинович.– М.: Недра, 1990. – 278 с.
22. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

#### R e f e r e n c e s

1. Makarov A.S., Kobitovich O.M., Savic'kij D.P., Egurnov O.I. Koloidno-himichni metodi otrimannja paliva na osnovi vidhodiv vuglezbagachennja // Visnik NAN Ukraini. – 2009. - №1. – S.56-67.
2. Savickij D.P., Makarov A.S., Zavgorodnij V.A. Reologicheskie svojstva vodougolnyh suspenzij na osnove buryh uglej v prisutstvii natrievyh ligno-sulfonатов i shhelochi // Himija tverdogo topliva. – 2009. - №5. – S.73–77.
3. Makarova K.V., Savickij D.P., Makarov A.S., Egurnov A.I. Vodougolnoe toplivo na osnove antracita // Jenergotehnologii i resursosberezhenie. – 2010. – №5. – S. 3–5.
4. Mosa E.S., Saleh A.M., Taha T.A. Effect of chemical additives on flow characteristics of coal slurries // Physicochemical Problems of mineral Processing. – 2008. – Vol. 42. – P.107–118.
5. Ur'ev N. B. Vysokokoncentrirovannye dispersnye sistemy. – М.: Himija., 1980. – 320s.
6. Hodakov G.S. Reologija suspenzij. Teorija fazovogo techenija i ee jeksperimental'noe obosnovanie // Rossijskij himicheskij zhurnal. – 2003. Т.47. - №2. – S.33–44.
7. Keat-Teong Lee, Kok-Chong Tan, Irvan Dahlan, Abdul Rahman Mohamed. Development of kinetic model for the reaction between SO<sub>2</sub>/NO and coal fly ash/ CaO/CaSO<sub>4</sub> sorbent // Fuel. — 2008. — Vol. 87. — P. 23–28.
8. Kameron Alistier. Teorija smazki v inzhenernom dele [Tekst] / Perevod s angl. inzh. V. A. Borodina ; Pod red. d-ra tehn. nauk V. K. Zhitomirskogo. - Moskva : Mashgiz, 1962. - 296 s.
9. Hrenkova T.M. Mehanohimicheskaja aktivacija uglej. — М., 1993.
10. Olofinskij E.P. Issledovanija gidromehaniki truboprovodnogo transportirovanija suspenzii // Issledovanija gidromehaniki suspenzij v truboprovodnom transporte. — М.: VNIPIgidrotuboprovod, 1985. — S. 4–8.
11. Pearson J.T. Hydrotropic and Adsorption Properties of Some Bis — Quaternary Ammonium Compounds and Related Cationic surfactants // J. Colloid and Interface Sci. — 1971. — Vol. 37. — №3. — P. 509–520.
12. Krut O.A. Vodovugilne palivo / O.A. Krut'. – К.: Naukova dumka, 2002. – 172 s.

13. Bileckij V.S. Perspektivi vprovadzhenja tehnologii vodovugilnogo paliva u malij teploenergetici Ukraїni / V.S. Bileckij, O.A. Krut, J.G. Svitlij // Forum girkiv: materiali mizhnarodnoї konferencii. – Dnipropetrovs'k, 2007. – S. 177 – 180.
14. Krut A.A. Vysokozolnye ugolnye shlamy – dopol-nitelnyj istochnik jenergonositelej / A.A. Krut // Zb. naukovih prac DNTU: serija elektrotehnika ta energetika.– 2001.– № 21.– S. 34 – 37.
15. Helle G., Nygaard B, Søren Kiilb, Johnssonb Jan E., Jørgen N. Jensena, Jørn Hansenb, Folmer Foghc, Kim Dam-Johansenb. Full-scale measurements of SO<sub>2</sub> gas phase concentrations and slurry compositions in a wet flue gas desulphurisation spray absorber // Fuel. — 2004. — Vol. 83. — p. 151–164.
16. Fu Xiao-an. A New Kind of Light Fuel Composed of Water/-Coal /Hydrocarbon / Xiao-an Fu [et al.] // The Proceedings of the 21st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 259 – 266.
17. Huettenhain Horst. Premium Coal-Water Fuel (CWF) / Horst Huettenhain, M.V. Chari // The Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – p. 1099 – 1108.
18. J.P. Adler, E.V. Markova, J.V. Granovskij. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij. Izdatelstvo "Nauka", Moskva 1976, 279s.
19. Longlian Cui, Liqian An, Hejin Jiang. A novel process for preparation of an ultra-clean superfine coal-oil slurry // Fuel. — 2007. — Vol. 83. — P. 1016.
20. Gjulmaliev A.M., Golovin G.S., Gladun T.G. Teoreticheskie osnovy himii uglja. — M.: Izd-vo MGGU, 2003. — 524 s.
21. Rabinovich E.Z. Gidravlika: uchebnoe posobie dlja vuzov / E.Z. Rabinovich.— M.: Nedra, 1990. – 278 s.
22. Smoldyrev A.E. Truboprovodnyj transport koncentrirovannyh gidrosmezej / A.E. Smoldyrev, Ju.K. Safonov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 256 s.

**Чернецька-Білецька Н.Б., Баранов І.О., Остапенко В.М., Мірошникова М.В.** Дослідження впливу гранулометричного складу водовугільного палива на його реологічні і гідродинамічні характеристики.

У статті було встановлено, що складність отримання водовугільного палива (ВВП) полягає в зміщенні просторової структурної сітки, утвореної частками вугілля, у міру зростання концентрації твердої фази. Отримання ВВП з необхідними технологічними властивостями можливо при досягненні бімодального гранулометричного складу, а також при введенні реагентів, що створюють ускладнення для коагуляції часток вугілля і формування електростатичного бар'єру між частками твердої фази. Встановлено, що бімодальність гранулометричного складу сприяє зниженню в'язкості суспензії за рахунок ролі дрібної фракції твердого компонента

ВВП. Визначено реологічні і гідродинамічні характеристики ВВП, вивчені закономірності впливу гранулометричного складу твердого компонента ВВП на його характеристики. Встановлено, що найбільш перспективним напрямком подальших досліджень є застосування отриманого рівняння регресії для визначення опору руху ВВП трубопровідним транспортом по рівнянню Букінгама.

**Ключові слова:** водовугільне паливо, ефективна в'язкість, напруження зсуву, концентрація, бімодальність, гранулометричний склад.

**Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Ostapenko V., Miroshnykova M.** Research influence granulometric composition water-coal fuel to rheological and hydrodynamic characteristics.

The paper established that with the help methods of colloid chemistry and physico-chemical mechanics is possible to efficiently create highly concentrated water coal fuel based on coal various grades with a concentration to 75% with necessary colloidal-chemical properties. Analysis studies showed to prepare the water-coal fuel (WCF) much possible concentration, it is necessary refine coal granulometric composition of maximum package, which is described by Alfred formula.

Obtaining WCF with necessary technological properties is possible when bimodal granulometric composition is reached, as well by introducing reagents make it difficult coagulate coal particles and form electrostatic barrier between particles of solid phase. It is established that bimodality granulometric composition helps reduce viscosity suspension due to role of fine fraction solid component WCF. The rheological and hydrodynamic characteristics WCF are determined, regularities influence of granulometric composition solid component WCF on its characteristics are studied.

Analysis existing theoretical studies and experimental data shows that most important factors affecting parameters of hydrotreating water-coal fuel are concentration solid component (C) and parameters characterizing bimodality of grain size distribution solid phase WCF.

**Keywords:** water-coal fuel, effective viscosity, shear stress, concentration, bimodality, granulometric composition.

**Чернецька-Білецька Н.Б.** – д.т.н., проф., зав. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля.

**Баранов І.О.** – старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля. mail: [baranov\\_90@inbox.ru](mailto:baranov_90@inbox.ru)

**Остапенко В.М.** – науковий співробітник кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля.

**Мірошникова М.В.** - асистент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля.

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 28.03.2017