

УДК 622.278

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ (ВУС)

А. А. КРУТЬ

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев  
04070, Киев, ул Андреевская, 19  
nina.ceti@gmail.com

Получено 12.10.2013

Предложена усовершенствованная технология получения водоугольных суспензий с учетом опыта и недостатков использования распространенной в мире технологии "Reocarb" (Италия, СССР). Определено влияние параметров мелющих тел шаровой мельницы на бимодальное гранулометрическое распределение измельченного угля. Представленные результаты реологических характеристик и седиментационной стабильности водоугольных суспензий, полученных в одной шаровой мельнице. Обоснованы граничные условия наличия коллоидных частичек угля для применения водоугольных суспензий в качестве топлива для теплоэнергетики. Также, с целью повышения эффективности измельчения угля и снижения энергоемкости процесса измельчения рассмотрены варианты получения водоугольной суспензии, в технологической цепочке которых реализуется "эффект Ребиндера". Представлены результаты экспериментальных исследований, которые проведены в сопоставимых условиях, и определены основные качественные характеристики водоугольных суспензий, полученных без и на основе эффекта Ребиндера. Предложены технические решения по конструкции смесительных аппаратов и технологии в целом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** водоугольная суспензия, бимодальность, гранулометрический состав, эффективность, мелющие тела, стабильность

Запропонована удосконалена технологія отримання водовугільних суспензій з урахуванням досвіду та недоліків використання розповсюдженої в світі технології "Reocarb" (Італія, СРСР). Визначено вплив параметрів мелючих тіл кульового млина на бимодальне гранулометричне розподілення подрібненого вугілля. Представлені результати реологічних характеристик та седиментаційної стабільності водовугільних суспензій, отриманих в одному кульовому млину. Обґрунтовані граничні умови наявності колоїдних частинок вугілля для використання водовугільних суспензій в якості палива для теплоенергетики. З метою підвищення ефективності подрібнення вугілля та зниження енергоємності процесу подрібнення розглянуто варіанти отримання водовугільної суспензії, в технологічному ланцюжку яких реалізується "ефект Ребіндера". Представлені результати експериментальних досліджень, які проведені у співставних умовах, та визначені основні якісні характеристики водовугільних суспензій, отриманих без та на основі ефекта Ребіндера. Запропоновані технічні рішення по конструкції змішувальних апаратів та технології в цілому.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** водовугільна суспензія, бимодальність, гранулометричний склад, ефективність, мелючі тіла, стабільність

The advanced technology to produce CWS accounting for the experience and shortages of the use of known in the world "Reocarb" technology (Italy, ex USSR) is suggested. The influence of parameters of milling balls of ball mill on bimodal granulometric distribution of milled coal has been determined. The parameters of rheology characteristics and sedimentary stability of CWS, obtained in a ball mill, are presented. The limiting conditions on the presence of colloidal coal particles in CWS for it using as a fuel for energy sector are founded. To increase the efficiency of coal milling and decrease energy consumption of the milling process, the variants of preparation of coal-water slurry (CWS) where "Rebinder-phenomenon" is used in a technological scheme have been considered. The results of experimental studies, made in the same conditions, are presented. Basic quality parameters of CWS, prepared on the basis of Rebinder-phenomenon and without it, were determined. Technical solutions on design of mixing apparatus and the process were suggested.

**KEY WORDS:** coal water slurry (CWS), bimodality, particle size distribution, efficiency, milling body, stability

### ВВЕДЕНИЕ

Получение водоугольных суспензий высокой концентрации с качественными реологическими, седиментационными и топливными характеристиками является существенной научной задачей, требующей проведения комплекса лабораторных исследований и испытания водоугольной суспензии (ВУС) в полупромышленных условиях.

В общем, технология получения ВУС предусматривает стадии обогащения угля, последовательного дробления и измельчения его до крупиности

0–100 (200–250) мкм, гомогенизацию суспензий с пластификаторами.

При этом первенствующее значение приобретает изучение роли гранулометрического состава твердой фазы суспензии и разработка методов его регулирования из условия обеспечения получения высококонцентрированной дисперсной топливной системы, обладающей приемлемыми реологическими характеристиками, необходимой статической и динамической стабильностью, а, следовательно, хорошими потребительскими свойствами.

В мире известны такие технологии приго-

товления ВУС как: “**Reocarb**” (Италия, СС-СР), “**Carbogel**” (Швеция, Канада), “**Co-Al**” (Великая Британия), “**Fluidcarbon**” (Швеция), “**Densecoal**” (Германия), имеют также свои технологии Япония и Украина.

Приведенные технологии включают две-три стадии измельчения угля с применением, в основном, барабанных стержневых и шаровых мельниц. Технологии запатентованы, однако их гранулометрические составы обладают одним общим свойством – бимодальностью, что существенно повышает их седиментационную стабильность и концентрацию за счет эффекта “максимальной упаковки” твердой фазы.

В Украине предложена усовершенствованная технология получения ВУС с учетом опыта и недостатков технологии “**Reocarb**”. Во-первых, помел угля осуществляют в одну стадию. Необходимого гранулометрического состава достигают изменением количества и диаметра мелющих тел шаровой мельницы. Во-вторых, предложено предварительное перемешивание угля и воды в специально сконструированном аппарате, после чего смесь поступает на измельчение. Эта операция подготовки смеси до измельчения дает возможность в 2.3–2.5 раза сэкономить энергию в процессе приготовления суспензии, а также существенно повысить ее качественные характеристики.

Экспериментальные исследования были проведены на стенде гидравлических испытаний (рис. 1), оборудованного на базе АОЗТ НПО “Хаймек”.

Экспериментальный стенд укомплектован трубопроводами диаметром от 100 до 500 мм и центробежными насосами с подачей до 1600–2500 м<sup>3</sup>/ч с приводом от двигателей постоянного тока, что даёт возможность плавного изменения числа оборотов. На стенде с трубопроводами внутренним диаметром 150 и 200 мм течение ВУС обеспечивалось углесосами НУ 450–130 ( $Q = 450$  м<sup>3</sup>/ч и  $H = 130$  м вод. ст.) и НУ 900–90 ( $Q = 900$  м<sup>3</sup>/ч и  $H = 90$  м вод. ст.). На стенде со стеклянным трубопроводом внутренним диаметром 100 мм был установлен шламовый насос ШН-250 ( $Q = 250$  м<sup>3</sup>/ч и  $H = 44$  м вод. ст.). Основное вспомогательное оборудование представлено серийно выпускаемыми дробилками, центробежными, плунжерными и винтовыми насосами, запорной и регулирующей арматурой и т.п. Отбор давления на расходомере Вентури, а также на измерительных участках трубопроводов осуществлялся через прозрачные стеклянные демпферы-разделители, соединенные с мембранными дифманометрами стальными трубками диаметром 1/4". Для измерения перепада давле-

ния использовались серийные дифференциальные манометры в комплекте со вторичными показывающими и записывающими приборами. Плотность гидросмесей определяли с помощью электромагнитных и радиоизотопных плотномеров.

Исследования, которые проводились по усовершенствованию приготовления ВУС и ее гидротранспортирования, осуществлялись на трубопроводах внутренним диаметром 150 мм, а также на лабораторных стеклянных и металлических трубопроводах внутренним диаметром 50 и 100 мм. Все стальные трубопроводы были оборудованы прозрачными вставками для визуальных наблюдений за характером потока гидросмеси, фиксирования начала выпадения твердого материала на дно трубы и размыва осевшего слоя при пуске после плановых и нештатных остановок.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных предпосылок были приняты положения, базирующиеся на опыте эксплуатации шаровых мельниц в различных отраслях промышленности, теории измельчения и данных экспериментальных исследований, полученных различными авторами [1–6].

При проведении опытов в качестве мелющих тел использовались стальные шары диаметром 10, 20 и 40 мм и были приняты следующие варианты загрузки мельницы (табл. 1).

В качестве объекта исследований был принят концентрат отсадочной машины угля марки “Г” крупностью 0–13 мм, дробленый в молотковой дробилке до 0–3 мм, зольностью на сухую массу  $A^d = 16.5$  % и влажностью на рабочую массу  $W_t^r = 7–9$  %. Исходный гранулометрический состав угля перед измельчением приведен в табл. 2. Дробленый уголь подавался на измельчение в шаровую мельницу в количестве, обеспечивающем заданную концентрацию водоугольной суспензии, туда же подавалась вода и химическая добавка “Дофен” (1 % на сухую массу угля). Водоугольное топливо после выхода из мельницы подвергалось гомогенизации в течение 10 минут в тихходной мешалке.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ приведенных в таблицах 2 и 3 данных показывает, что гранулометрические составы угля, полученные в процессе мокрого измельчения

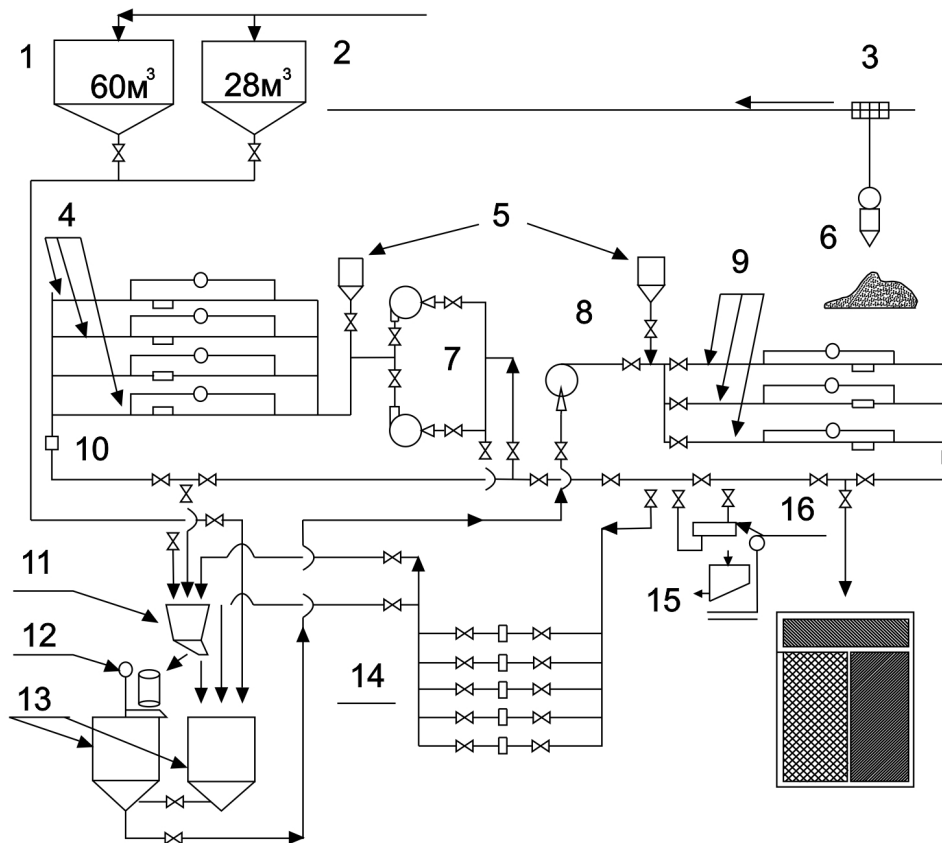


Рис. 1. Принципиальная схема стенда гидравлических исследований:

1, 2 – резервуары чистой воды; 3 – электротельфер; 4 – трубы диаметром 300, 350, 400 и 500 мм; 5 – загрузочные воронки; 6 – измерительная бадья; 7 – насосы 12Р-7 и 20Р-1 1; 8 – углесос 10У-4; 9 – трубы диаметром 150, 200 и 250 мм; 10 – расходомер; 11 – перекидное устройство; 12 – объёмно-весовой мерник; 13 – измерительные ёмкости (25 м³); 14 – метрологическая установка; 15 – бак для отбора проб; 16 – барабанный пробоотборник

Табл. 1. Гранулометрический состав мелющих тел

Варианты загрузки	Гранулометрический состав шаровой загрузки мельницы, %			
	Диаметр шаров, мм			Средневзвешенный диаметр, мм
	40	20	10	
1	100	-	-	40
2	50	25	25	27.5
3	60	20	20	30.0
4	40	30	30	25.5
5	70	15	15	32.5

Табл. 2. Гранулометрический состав угля перед измельчением

Крупность, мм	+ 3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,25-0,3	0,1-0,25	0,08-0,1	0,04-0,08	0-0,04
Выход классов, %	0,76	7,71	19,52	14,24	12,35	10,24	4,41	30,77

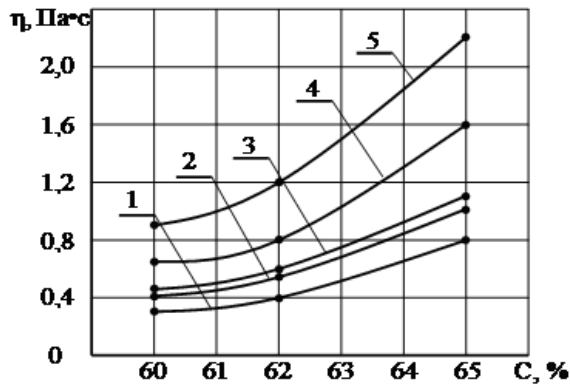


Рис. 2. Зависимость коэффициента вязкости от массовой концентрации и гранулометрического состава при  $\dot{\epsilon}=9 \text{ с}^{-1}$

в шаровой мельнице при различных вариантах шаровой загрузки, значительно отличаются между собой. Выход класса 0–0.02 мм, который и определяет приближение суспензии к коллоидному состоянию, изменяется от 25 % при приготовлении ВУС по технологическому варианту I до 42.5 % при варианте IV. Остаток на контрольном сите 0.09 мм составляет 37.8 % в первом случае и 19.8 – во втором.

Опыт мировой практики и данные исследований на опытно-промышленных (пилотных) установках свидетельствуют о том, что верхний предел крупности твердой фазы водоугольной суспензии с удовлетворительными характеристиками котельного и печного топлива не должен превышать 0.35–0.20 мм, а массовая концентрация частиц крупностью  $0.25 < d < 0.35$  мм не должна быть более 2–3 %.

В этом плане требованиям по максимальной крупности не удовлетворяет гранулометрический состав угля в суспензии, полученной при загрузке мельницы исключительно шарами диаметром 40 мм (вариант I), хотя этот вариант и является наименее энергоемким.

На рис. 2 приведены зависимости касательных напряжений  $\tau$  от градиента скорости  $\dot{\epsilon}$  и гранулометрического состава измельченного исходного угля при различных массовых концентрациях водоугольной суспензии, полученные путем обработки экспериментальных данных.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что реологические характеристики ухудшаются при поочередном использовании вариантов V, III, II, IV. При этом независимо от грансостава измельченного исходного угля и концентрации суспензии все кривые  $\tau = f(\dot{\epsilon})$  указывают на псев-

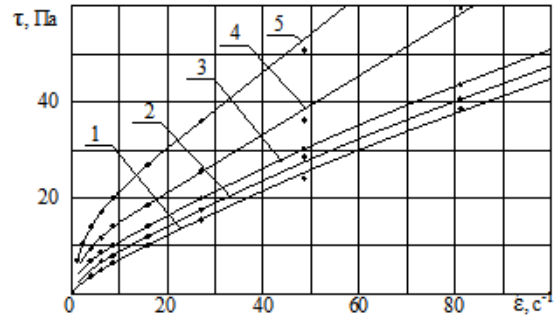


Рис. 3. Зависимость касательных напряжений от градиента скорости и гранулометрического состава при массовой концентрации 65 %: 1, 2, 3, 4, 5 – при загрузке шаровой мельницы по вариантам I, V, III, II, IV соответственно

допластичный характер течения.

В диапазоне проведенных исследований изменение массовой концентрации водоугольной суспензии от 60 до 65 % заметного влияния на процесс измельчения не оказывает.

Исследование зависимости эффективной вязкости суспензии от концентрации и грансостава показало, что наиболее предпочтительными с точки зрения структурно-реологических характеристик водоугольного топлива являются технологические варианты I, V и III (рис. 3. кривые 1, 2, 3).

В этом случае даже при сравнительно высокой концентрации водоугольной суспензии (до 65 %) эффективная вязкость при градиенте скорости  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  не превышает 1.1 Па·с, что полностью удовлетворяет требованиям.

Выход тончайших классов (в экспериментах в качестве критерия принята крупность менее 20 мкм) для различных вариантов гранулометрического состава мелющих тел изменялся от 25 % (вариант I) до 42.5 % (вариант IV) и остаток на контрольном сите 0.09 мм (0.08–0.10) составлял соответственно для этих же вариантов 37.8 % и 19.8 %. Четких критериев получения и выбора гранулометрического состава угля в водоугольном топливе и, в частности, оптимального содержания в нем коллоидных и тончайших частиц в существующих источниках информации не имеется. При этом не названа конкретно даже определяющая группа крупности, которая по различным данным может включать как класс 0–0.005 или 0–0.010 мм, так и 0–0.020, 0–0.40 и даже 0–0.063 мм. Как правило, технология измельчения и гранулометрический состав угля в водоугольном топливе, выбранные и полученные в процессе экспериментирования и запатентованные разными авторами, являются предметом “know-how” разработчика.

Табл. 3. Гранулометрический состав измельченного продукта

Крупность, мм	Варианты загрузки шаровой мельницы										
	I		II		III		IV		V		
	$\gamma$ , %	$\Sigma\gamma$ , %	$\gamma$ , %	$\Sigma\gamma$ , %	$\gamma$ , %	$\Sigma\gamma$ , %	$\gamma$ , %	$\Sigma\gamma$ , %	$\gamma$ , %	$\Sigma\gamma$ , %	
+ 0,50	0,7	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,30-0,50	0,8	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,25-0,30	0,6	2,1	0,1	0,1	0,5	0,5	–	–	1,1	1,1	–
0,20-0,25	2,8	4,9	2,8	2,9	2,7	3,2	–	–	3,3	4,4	–
0,10-0,20	9,9	14,8	8,0	10,9	8,5	11,7	4,3	4,3	9,2	13,6	–
0,08-0,10	23,0	37,8	18,5	29,4	19,5	31,2	15,5	19,8	21,9	35,5	–
0,04-0,08	7,1	44,9	6,5	35,9	6,8	38,0	4,5	24,3	6,1	41,6	–
0,02-0,04	30,1	75,0	33,8	69,7	34,0	72,0	33,2	57,5	31,9	63,5	–
– 0,02	25,0	100	30,3	100	28,0	100	42,5	100	26,5	100	–

Сравнительная оценка влияния гранулометрического состава мелющих на выход класса крупностью 0–0,02 мм в процессе измельчения произведена в зависимости от средневзвешенного диаметра шаров, загружаемых в мельницу. Данные представлены в виде графика на рис. 4.

Анализируя приведенные данные, можно отметить следующее:

- выход микронных классов ( $-20$  мкм) при прочих равных условиях увеличивается по мере уменьшения средневзвешенного диаметра шаров, загруженных в мельницу;
- при уменьшении средневзвешенного диаметра шаров с 40 до 25 мм, т.е. в 1,6 раза, выход класса  $-20$  мкм увеличивается с 25 до 42,5 %, т.е. в 1,7 раза;
- зависимость  $Y(d_{ср.ш.})$  – нелинейная: при уменьшении средневзвешенного диаметра шаров с 40 до 27,5 мм выход класса  $-20$  мкм увеличился на 12 %, а при уменьшении средневзвешенного диаметра с 27,5 до 25 мм – на 14 %;
- четко выраженная зависимость  $\gamma_{0.02} = f(d_{ср.ш.})$  при практическом отсутствии разброса опытных точек в корреляционном поле указывает на корректность выполненных экспериментов.

Дальнейшая оценка влияния гранулометрического состава угля, полученного в результате измельчения его в шаровой мельнице при различных вариантах шаровой загрузки, на качество и характеристики водоугольного топлива производилось на основании седиментационных и реологических исследований, в результате выполнения которых установлено следующее.

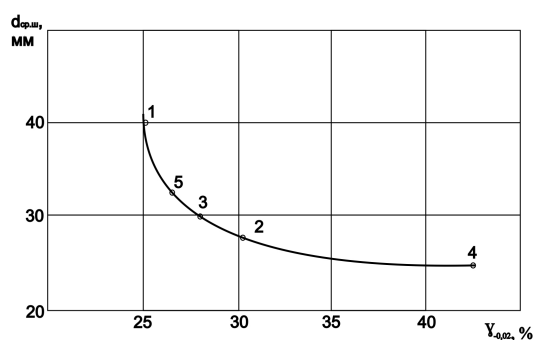


Рис. 4. Зависимость выхода класса 0–0,02 мм от средневзвешенного диаметра шаровой загрузки

Суспензия, полученная на основании гранулометрического состава угля по варианту I не отвечает требованиям, предъявляемым к водоугольному топливу ни по максимальной крупности, ни по седиментационной устойчивости (срок хранения не более 1 суток), на графике рис. 4 точка 1.

Дисперсная фаза водоугольной суспензии, приготовленной по варианту IV, представлена углем, крупность которого не превышает 0,200 мм, а содержание класса 0 – 0,080 мм составляет 80,2 %. Такая суспензия исключительно стабильна, агрегативно устойчива, не расслаивается в течение 30 суток. В исследованном диапазоне изменения концентраций от 60 до 65 % агрегативная стабильность – не менее 15 суток. Однако изменение реологических параметров суспензии во времени происходит быстро и на 15-е сутки после хранения вязкость при скорости сдвига  $= 9 \text{ с}^{-1}$  и концентрации суспензии  $C = 62 \%$  увеличивается в 5 раз, а дальнейшее хранение приводит к полной потере текучести. В данном случае, очевидно, что пе-

ренасыщение суспензии коллоидными частицами, когда они уже не могут находиться в дефлокулированном состоянии, вызывает резкое изменение ее реологических свойств.

Наконец, оценивая седиментационные, агрегативные и реологические характеристики водоугольного топлива, полученного на основе угля с гранулометрическим составом по вариантам II, III, V (срединные значения по выходу класса 0 – 20 мкм, точки на графике 2, 3, 5), можно отметить следующее.

Суспензия, приготовленная с использованием угля с гранулометрическим составом по варианту II, не обладает стабильностью реологических свойств: эффективная вязкость при массовой концентрации  $C = 62\%$  через трое суток хранения увеличивается на 50–60 %, т.е. вариант II тяготеет к варианту IV.

Суспензия, приготовленная по варианту V, не обладает седиментационной стабильностью, расслаивается в течение непродолжительного времени, образуя плотный, вязкий, трудно размешиваемый осадок в нижней части объема, что практически исключает использование ее в качестве стабильного топлива (вариант аналогичен варианту I).

Оптимальным гранулометрическим составом угля, позволяющим получить водоугольное топливо с высокой степенью насыщения, обладающее сравнительно высокой стабильностью реологических характеристик, седиментационной и агрегативной устойчивостью и обеспечивающее беспрепятственное прохождение его через каналы и отверстия форсунок при подаче топливной системы на сжигание, является гранулометрический состав, полученный при измельчении по варианту III.

Установлено соотношение между шарами при шаровой загрузке. В этом случае оно должно быть следующим: 60 % шаров диаметром 40 мм, 20 % – диаметром 20 мм и 20 % – диаметром 10 мм.

Исследования убедительно показывают, что в процессе приготовления водоугольного топлива как недоизмельчение угля, так и переизмельчение может оказать существенное, в том числе и отрицательное влияние на его качество и общие характеристики.

Численная обработка результатов экспериментальных исследований реологических характеристик ВСВК, полученных из углей с различными бимодальными гранулометрическими составами, позволяет рекомендовать следующие зависимости для расчета предельного напряжения при сдвиге и эффективной вязкости ВСВК:

$$\tau_0 = \begin{cases} 0.4061 \cdot \Gamma^{1.7471} & C < 65; \\ \frac{7.2856}{\Gamma^{0.9267}} & C \geq 65; \end{cases} \quad (1)$$

$$\eta = 0.2921 \cdot \Gamma^{0.40261}; \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{P_{-0.08}}{P_{+0.08}}, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – параметр, характеризующий бимодальность гранулометрического состава твердой фазы ВСВК;  $P_{-0.08}$  – доля частиц твердой фазы ВСВК крупностью менее 0.08 мм;  $P_{+0.08}$  – доля частиц твердой фазы ВСВК крупностью более 0.08 мм;  $C$  – массовая концентрация суспензии, %.

Приведенные формулы (1) – (3) предназначены для расчета реологических параметров ВСВК, приготавливаемых без использования пластификаторов и химических добавок.

### 3. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Из соображений снижения энгергоемкости измельчения исходного твердого материала при соответствующем повышении потребительских свойств водоугольного топлива были выполнены исследования измельчения с предварительным смешением композиционных компонентов. Известно, что при увлажнении каменного угля крепость его снижается на 18–20 %. Еще большего положительного эффекта (снижения крепости угля минимум в 2 раза) можно достичь в случае насыщения угольной массы растворами поверхностно-активных веществ, т.е. используя так называемый „эффект Ребиндера”, суть которого состоит в адсорбционном снижении крепости. Молекулы поверхностно-активных веществ проникают в зону предварительного разрушения (например, к вершинам трещин) и уменьшают расход энергии на создание новой поверхности. Таким образом, сущность „эффекта Ребиндера” заключается в снижении энгергоемкости деформации и разрушения вследствие сокращения работы, затрачиваемой на создание единицы поверхности. Процесс адсорбции при этом должен происходить одновременно с процессом разрыва связей в момент создания новой элементарной ячейки поверхности, то есть для адсорбционного снижения крепости необходимым и обязательным является соединение действия среды и механических напряжений.

Поскольку адсорбция поверхностно-активных веществ сопровождается сольватацией поверхности, что приводит к появлению положительного раскливающего давления и развития новых микротрещин, дальнейшее разрушение тела происходит под действием небольших механических нагрузок. Кроме того, увлажнение угольной массы способствует снижению её крепости не только за счет “эффекта Ребиндера”, а и за счет частичного распада кристаллизационных связей [6, 7]. Изложенное выше дает основание предположить, что “эффект Ребиндера” может быть успешно реализован в технологии приготовления водоугольного топлива, если увеличить продолжительность контакта дробленого в дробилке угля с водой или другой дисперсной средой при одновременном механическом воздействии на гидросмесь, не повышая при этом общую продолжительность измельчения.

#### 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследования с целью сопоставления помола угля с предварительным перемешиванием в специально разработанном смесителе-питателе с шнековым или роторным исполнительным органом и без перемешивания были проведены на угле марки “Г” зольностью  $A^d = 16.5\%$  при влажности  $W_t^t = 12.0$  после дробления его в молотковой дробилке до крупности 0–3 мм %. В качестве химической добавки-пластификатора был использован суперпластификатор “Дофен” (1 % на сухую массу). Оба технологических варианта приготовления водоугольного топлива были проведены при одной и той же производительности мельницы, а также одинаковом количестве и соотношении компонентов водоугольного топлива, при которых массовая концентрация его составляла 62 %. Качество готового водоугольного топлива оценивалось по гранулометрическому составу измельченного продукта, реологическим характеристикам и седиментационной устойчивости. Гранулометрический состав исходного продукта до измельчения приведен в табл. 4.

Принципиальная технологическая схема угля дробления с предварительным перемешиванием компонентов приведена на рис. 5.

Гранулометрический состав продукта измельчения в шаровой мельнице с предварительным перемешиванием и без него приведен в табл. 5

Статическая седиментационная стабильность водоугольного топлива оценивалась по отношению содержания сухого угля в образцах из верхней и нижней частей замороженного в вертикальном ци-

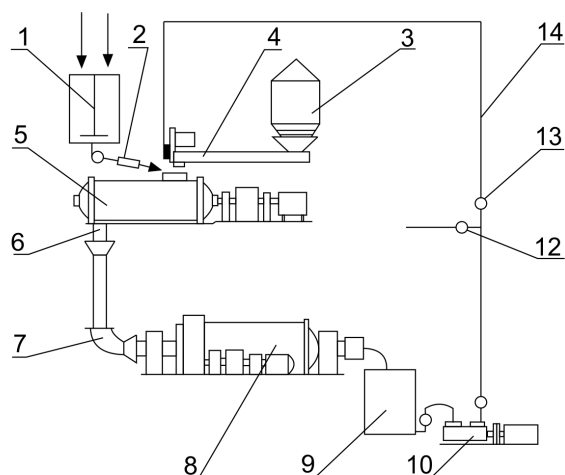


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема измельчения угля с предварительным перемешиванием:

1 – ёмкость для воды; 2 – дозатор подачи воды; 3 – передвижной бункер дробленого угля; 4 – шнековый дозирующий питатель; 5 – питатель-перемешиватель; 6 – заслонка; 7 – загрузочное устройство; 8 – шаровая мельница; 9 – приемная емкость; 10 – винтовой насос; 11 – трубопровод готового топлива; 12, 13 – задвижки; 14 – трубопровод некондиционного топлива

линдрическом сосуде объема водоугольной суспензии после хранения в течение различного промежутка времени.

Интенсивность деградации, т.е. изменение реологического состояния водоугольной суспензии, определялась путем измерения касательных напряжений сдвига при градиенте скорости  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  и температуре  $t = 20^\circ \text{ C}$  сразу после приготовления и через определенные промежутки времени с предварительным перемешиванием исследуемого образца. Исходя из назначения водоугольного топлива, предельным с точки зрения качества принимали такое значение касательного напряжения сдвига, при котором эффективная вязкость при данном градиенте скорости не превышает 1.2–1.8 Па·с.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ приведенных в таблице 5 данных показывает, что в первом случае (без предварительного перемешивания) содержание класса + 0.1 мм составляет 24.35 %, а во втором – 11.8 %. Соответственно класса 0–0.04 мм – 52.92 % против 63.1 %, а класса -0.02 мм – 24.0 % против 29.3 %.

Табл. 4. Грансостав угля до измельчения

Классы крупности, мм	Выход класса, %	Суммарный выход классов, %
+ 3	8,90	8,90
1,0 – 3,0	19,65	28,55
0,5 – 1,0	18,10	46,65
0,2 – 0,5	15,50	62,15
0,1 – 0,2	5,00	67,15
0,08 – 0,1	4,95	72,109
0 – 0,08	27,90	100,0
Всего:	100,0	

Табл. 5. Гранулометрический состав измельченного угля

Классы крупности, мм	Без предварительного перемешивания		С предварительным перемешиванием	
	Выход класса, $\gamma$ %	Суммарный выход, $\Sigma\gamma$ %	Выход класса, $\gamma$ , %	Суммарный выход, $\Sigma\gamma$ %
0.30 – 0.50	1.86	1.86	0.50	0.50
0.25–0.30	4.37	6. 23	2.50	36.90
0.10–0.25	18.12	24.35	8.80	11.80
0.08–0.10	15.29	39.64	19.20	31.00
0.04–0.08	7.44	47.08	5.90	36.90
0.00–0.04	52.92	100.00	63.10	10.00
Всего	100.0	–	100.0	–

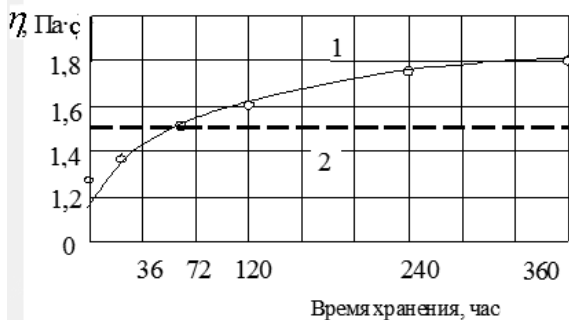


Рис. 6. Изменение вязкости ВУТ при хранении

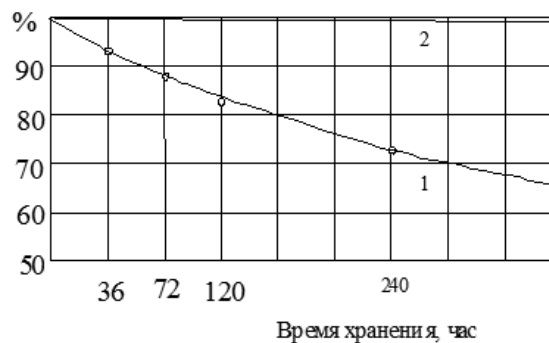


Рис. 7. Статическая стабильность ВУТ при хранении в течение продолжительного времени

Отмеченные различия гранулометрического распределения продуктов измельчения с предварительным перемешиванием и без него дают основание предположить большую агрегатную и седиментационную устойчивость водоугольного топлива, приготовленного по второму технологическому варианту, что обеспечивает возможность повышения концентрации водоугольной суспензии, увеличения расстояния транспортирования и времени хранения, что и подтверждают результаты исследований (рис. 6. и 7).

Сравнительный анализ водоугольных суспен-

зий, приготовленных с предварительным перемешиванием и без, показывает, что и в первом, и во втором случаях сразу после приготовления они обладают удовлетворительной текучестью и стабильностью, соответствующими назначению котельного топлива и технологии его сжигания. Качество водоугольной суспензии как котельного топлива повышается, если эти характеристики не изменяются при длительном хранении и транспортировании на значительные расстояния при сохранении на прежнем уровне агрегатной устойчиво-



Табл. 6. Основные параметры и свойства водоугольных суспензий

Параметры	Вариант	Время хранения суспензии, час					
		0	24	72	120	240	360
касательное напряжение сдвига при скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$	1	10.5	12.5	13.6	14.2	16.0	16.2
	2	13.5	13.4	13.5	13.6	13.6	13.5
Эффективная вязкость $\eta$ (Па·с) при скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$	1	1.17	1.39	1.51	1.58	1.78	1.80
	2	1.50	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51
Статическая стабильность, %	1	100	96.8	90.8	85.0	74.6	66.7
	2	100	100	100	100	99.6	98.8

сти.

Выполненные исследования показали, что по статической и динамической седиментационной стабильности, агрегатной устойчивости и реологическим характеристикам водоугольные суспензии, приготовленные без предварительного перемешивания, уступают приготовленным с предварительным перемешиванием.

Расслоение такой суспензии при массовой концентрации, равной 62 %, происходит уже через сутки с образованием относительно плотного, трудно смешиваемого и весьма вязкого осадка. При снижении массовой концентрации такой водоугольной суспензии до 60 % при прочих равных условиях расслоение её происходит уже в течение двух часов.

С нарушением седиментационной стабильности при продолжительном хранении снижается агрегативная устойчивость, что усложняет условия транспортирования водоугольного топлива по трубопроводам и снижает качество распыла при подаче в камеру сгорания. Такое явление, по-видимому, объясняется несбалансированностью распределения в дисперсной системе коллоидных, мелких и сравнительно крупных частиц. Очевидно, содержание в системе частиц угля крупностью 0–0.04 мм, равное 52.92 %, не обеспечивает создания стабильной среды, удерживающей во взвешенном состоянии более крупные частицы.

Реологические свойства такой водоугольной суспензии в зависимости от времени хранения не остаются постоянными, а изменяются, хотя и незначительно. При хранении в течение 360 часов (15 суток) касательное напряжение и эффективная вязкость при скорости сдвига,  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  увеличиваются в 1.5 раза.

В отличие от водоугольной суспензии, приготовленной без предварительного перемешивания компонентов (рис. 8), водоугольная суспензия, приготовленная с предварительным перемешиванием компонентов, в достаточной мере отвечает требованиям по агрегативной устойчивости и статиче-

ской седиментационной стабильности.

Водоугольное топливо, приготовленное по этой технологии, при массовой концентрации  $C = 62 \%$  не расслаивается как минимум в течение 10 суток, а при увеличении концентрации до  $C = 64 \%$  статическая стабильность его сохраняется на протяжении 15 суток.

При этом наблюдается лишь незначительное перераспределение в контрольном образце концентрации и гранулометрического состава по высоте цилиндра.

Данные измерений, полученные в результате послойного анализа проб в контрольных цилиндрах, показывают, что в нижней части объема, занятого суспензией, концентрация на 1–2 % выше средней, а в верхней части, где содержатся мельчайшие угольные частицы, – ниже примерно на такую же величину. Непродолжительная гомогенизация водоугольного топлива полностью восстанавливает его агрегативное состояние и приводит к равномерному распределению в объеме композиционных составляющих.

После такой гомогенизации реологические характеристики водоугольного топлива практически не отличаются от исходных, замеренных сразу после его приготовления. При этом очевидно, что содержание в водоугольной суспензии 63.1 % твердых частиц крупностью 0–0.04 мм (–0.02 мм – 29.3 %) является необходимым и достаточным для образования в совокупности с химической добавкой и диспергирующей средой устойчивой дисперсной системы. Сравнительная оценка основных свойств и параметров водоугольных суспензий при массовой концентрации  $C = 62 \%$ , приготовленных по различным технологическим вариантам, приведена в таблице 6.

Анализ приведенных в табл. 6 данных показывает, что реологические параметры водоугольной суспензии, приготовленной с предварительным смешением исходных компонентов, на протяжении опыта практически оставались неизменными.

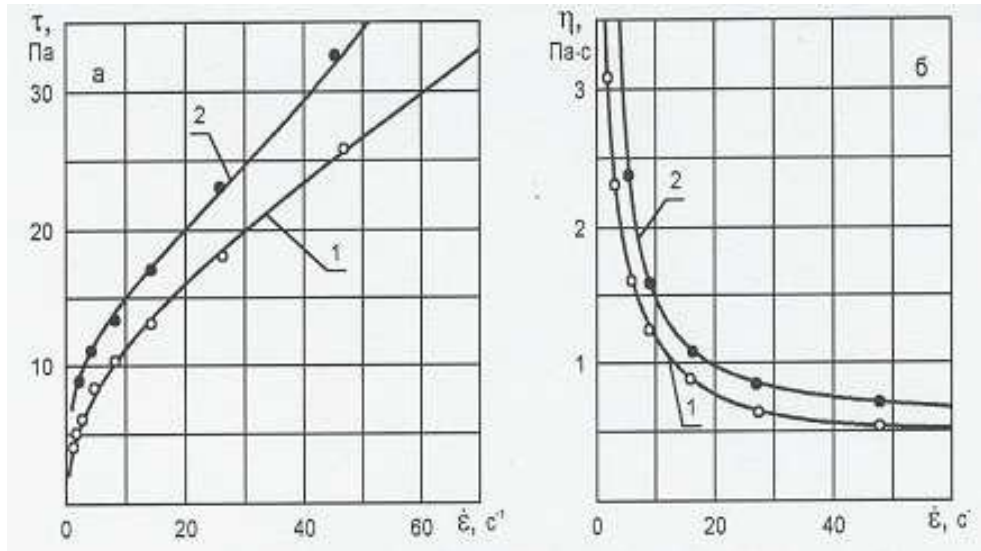


Рис. 8. Зависимость касательных напряжений (а) и эффективной вязкости (б) от градиента скорости (скорости сдвига):  
1, 2 – измельчение с предварительным перемешиванием и без предварительного перемешивания соответственно

Таким образом, выполненные исследования показывают, что введение в технологический процесс приготовления водоугольного топлива дополнительной операции предварительного перемешивания исходных компонентов позволяет при прочих равных условиях обеспечить более тонкий помол угля в шаровой мельнице и значительно увеличить выход классов, определяющих как реологическое, так и агрегативное состояние дисперсной системы.

Первоначальная технологическая обработка исходных компонентов (процесс предварительного перемешивания) создает благоприятные условия для измельчения дисперсной фазы в шаровой мельнице. При этом для условий, принятых в эксперименте, увеличение выхода классов крупностью 0–0.04 мм в совокупности с 52.92 % при приготовлении водоугольного топлива без предварительного перемешивания компонентов до 63.1 % с предварительным перемешиванием, т.е. на 10.18 % по абсолютной величине, позволяет получить высококонцентрированную суспензию со стабильными реологическими и седиментационными характеристиками.

Результаты исследований на полупромышленных стендах показывают, что величины статической стабильности и эффективной вязкости ВСВК при хранении в течение 360 часов остаются постоянными, а величина предельного напряжения при сдвиге увеличивается (табл. 6).

На основе статистической обработки данных эк-

спериментов величину предельного напряжения при сдвиге в зависимости от срока хранения рекомендуется определять по формуле

$$\tau_0 = K_T \cdot \tau_0^*;$$

$$K_T = 1.04 + 0.004 \cdot T - 10^{-5} \cdot T^2 + 10^{-8} \cdot T^3,$$

где  $\tau_0$  – предельное напряжение при сдвиге ВСВК после хранения в течение заданного времени;  $\tau_0^*$  – предельное напряжение при сдвиге ВСВК сразу после приготовления суспензии;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий время хранения ВСВК в течение не более 360 час после приготовления;  $T$  – время хранения, час.

Таким образом, результаты исследований (см. рис. 8, табл. 6) подтверждают, что применение предварительного перемешивания исходных компонентов в технологии приготовления ВСВК обеспечивает возможность повышения концентрации суспензии, увеличение расстояния транспортирования и времени хранения.

Дисперсная фаза водоугольного топлива может быть представлена различными по составу и качеству углями, отличающимися степенью метаморфизма, зольностью, минералогическим составом золы, что обуславливает различие гранулометрических составов продукта измельчения. Поэтому и выбор оптимального гранулометрического состава угля в водоугольном топливе для каждого конкретного случая должен производиться на базе опытных данных, полученных на стадиях пред-



щим: 60% шаров диаметром 40 мм, 20% – диаметром 20 мм и 20% диаметром 10 мм

4. Установлено, что изменение массовой концентрации водоугольной суспензии от 60 до 65 % заметно влияет на процесс измельчения не оказывает. Это позволяет рассматривать процесс приготовления ВСВК независимо от концентрации суспензии, оптимальные значения которой в этом случае обуславливаются требованиями технологии гидротранспортирования и использования ВСВК.
1. Бессонов Е.А. Технология и механизация гидромеханизированных работ.– М.: Центр, 1999.– 544 с.
2. Гоштовт В.И. Определение оптимальной консистенции гидросмеси при транспортировании мелкого угля // Гидравлическая добыча угля // М.: ЦНИИТЭИуголь.– 1967.– № 12.– С. 25–28.
3. Білецький В.С., Круть О.А., Світлий Ю.Г. Рациональне подрібнення вугілля у технології виготовлення водовугільного палива // Зб. наукових праць ДНТУ, сер. Електротехніка та енергетика.– 2008.– Вип.. 45 (131).– С. 27–39.
4. Дмитриев Г.П. Напорные гидротранспортные системы [справочное пособие].– М.: Недра, 1991.– 304 с.
5. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов.– М.: Химия, 1988.– 256 с.
6. Юфин А.П. Гидромеханизация.– М.: Изд-во лит. по строительству, 1965.– 496 с.
7. Harrison Clark D. Alternative Fuels from Slurry Ponds / Clark D. Harrison, David J. Akers, Richard W. Carson // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 141–148.