

**Ю.Г. СВІТЛИЙ, О.А. КРУТЬ**

(Україна, Донецьк, Науково-виробниче об'єднання "Гаймек"),

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА: ВПЛИВ ГРАНУЛОМЕТРІЇ МЕЛЮЧИХ ТІЛ**

*Постановка проблеми і стан її вивчення.* У світовій практиці набула поширення технологія приготування висококонцентрованого водовугільного палива (ВВП) "Реокарб", яка передбачає подрібнення вихідного продукту в кульовому і потім стрижневому млинах. Відомо, що реологія дисперсних систем визначається такими основними контрольованими технологічними факторами, як вміст твердого в суспензії, крупністю і гранулометричним складом твердої фази, якістю диспергуючого середовища (води і пластифікатора) і деякими іншими технологічними параметрами (напр. температурою). Вплив цих факторів на характеристики ВВП досліджено в ряді робіт [1-4]. Зокрема вдосконалення технології "Реокарб", проводилося в напрямку зниження енергоємності процесу шляхом подрібнення в одну стадію в кульовому млині [1]. Перспективним є регулювання гранулометричного складу подрібненого продукту шляхом зміни гранулометрії кульового завантаження [2].

*Мета цієї роботи* – продовження і розвиток досліджень впливу гранулометрії мелючих тіл на характеристики одержуваного висококонцентрованого водовугільного палива.

*Виклад основного матеріалу.* Для оцінки впливу гранулометрії мелючих тіл на характеристики одержуваного ВВП був проведений комплекс лабораторних досліджень і випробувань водовугільної суспензії в напівпромислових умовах. При цьому велику увагу було приділено вивченню ролі гранулометричного складу твердої фази суспензії та розробці методів його регулювання з умови отримання висококонцентрованої дисперсної паливної системи, яка має прийнятні реологічні характеристики, необхідну статичну та динамічну стабільність, а, отже, добрі технологічні характеристики.

Як правило, вихідне для приготування водовугільної суспензії рядове вугілля завантажується в кульові і стержневі млини після попереднього дроблення до крупності менше 3 мм (рідше 6 мм) в дробарках різних типів. При використанні як вихідного продукту вугільних шламів операція дроблення спрощується або навіть виключається, однак, шлами проходять контрольну класифікацію на ситі з отворами 3 мм. При проведенні наших досліджень в якості мелючих тіл використовувалися сталеві кулі діаметром 10, 20 і 40 мм і були прийняті наступні варіанти завантаження ними млина (табл. 1).

## Підготовчі процеси збагачення

Таблиця 1

Варіанти завантаження мелючих тіл	Гранулометричний склад мелючих тіл			
	Гранулометричний склад кульового завантаження млина, %			
	Діаметр куль, мм			Середній діаметр, мм
40	20	10		
I	100	–	–	40,0
II	50	25	25	27,5
III	60	20	20	30,0
IV	40	30	30	25,5
V	70	15	15	32,5

Як об'єкт досліджень був прийнятий концентрат відсаджувальної машини вугілля марки "Г" крупністю 0-13 мм, подрібнений в молотковій дробарці до 0-3 мм, зольністю на суху масу  $A^d = 16,5\%$  і вологістю на робочу масу 7-9% . Оригінальний гранулометричний склад вугілля перед подрібненням наведено в табл. 2. Дроблене вугілля подавалося на подрібнення в кульовий млин у кількості, що забезпечує задану концентрацію водовугільної суспензії, туди ж подавалася вода і хімічна добавка "Дофен" (1% на суху масу вугілля). Водовугільне паливо після виходу із млина піддавалося гомогенізації протягом 10 хвилин у тихохідній мішалці.

Таблиця 2

Крупність, мм	Гранулометричний склад вугілля перед подрібненням							
	+ 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
Вихід класів, %	0,76	7,71	19,52	14,24	12,35	10,24	4,41	30,77

Аналіз наведених в таблицях 2 і 3 даних показує, що гранулометричні склади вугілля, отримані в процесі мокрого подрібнення в кульовому млині при різних варіантах кульового завантаження, значно відрізняються між собою. Вихід класу 0-0,02 мм, який і визначає наближення суспензії до колоїдного стану, змінюється від 25% при приготуванні ВВП по технологічному варіанту I до 42,5% при варіанті IV. Залишок на контрольному ситі 0,09 мм становить 37,8% у першому випадку і 19,8% – у другому.

Гранулометричний склад подрібненого вугілля

Крупність, мм	Варіанти завантаження кульового млина										
	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	1,1
0,20-0,25	2,8	4,9	2,8	2,9	2,7	3,2	–	–	3,3	4,4	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	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	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	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	63,5
– 0,02	25,0	100	30,3	100	28,0	100	42,5	100	26,5	100	100

Досвід світової практики і дані досліджень на дослідно-промислових (пілотних) установках свідчать про те, що верхня межа крупності твердої фази водовугільної суспензії із задовільними характеристиками котельного і пічного палива не повинна перевищувати 0,35-0,20 мм, а масова концентрація частинок крупністю  $0,25 < d < 0,35$  мм не повинна бути більше 2-3%. У цьому плані вимогам за максимальною крупністю не задовольняє гранулометричний склад вугілля в суспензії, отриманої при завантаженні млина виключно кулями діаметром 40 мм (варіант I), хоча цей варіант і є найменш енергоємним.

На рис 1 і 2 наведені отримані експериментально закономірності зміни в'язкості водовугільної суспензії  $\eta$  (Па · с) і дотичних напружень  $\tau$  (Па) від масової концентрації  $C$  (%) і гранулометричного складу подрібненого вихідного вугілля при різному градієнті швидкості  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{с}^{-1}$ ). Наведені дані свідчать про те, що реологічні характеристики погіршуються при використанні варіантів V, III, II, IV. При цьому незалежно від гранулометричного складу подрібненого вихідного вугілля і концентрації суспензії всі криві  $\tau = f(\dot{\epsilon})$  вказують на псевдопластичний характер течії. У діапазоні проведених досліджень зміна масової концентрації водовугільної суспензії від 60 до 65% помітного впливу на процес подрібнення не справляє. Дослідження залежності ефективної в'язкості суспензії від концентрації і гранулометричного складу показало, що найкращими з точки зору структурно-реологічних характеристик водовугільного палива є технологічні варіанти I, V і III (рис. 1 криві 1, 2, 3).

У цьому випадку навіть при порівняно високій концентрації водовугільної суспензії (до 65%) ефективна в'язкість при градієнті швидкості  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  не перевищує 1,1 Па·с, що повністю задовольняє вимогам. Вихід найтонших класів крупністю менше 20 мкм для різних варіантів гранулометричного складу помольних тіл змінювався від 25% (варіант I) до 42,5% (варіант IV), і залишок на контрольному ситі 0,09 мм.

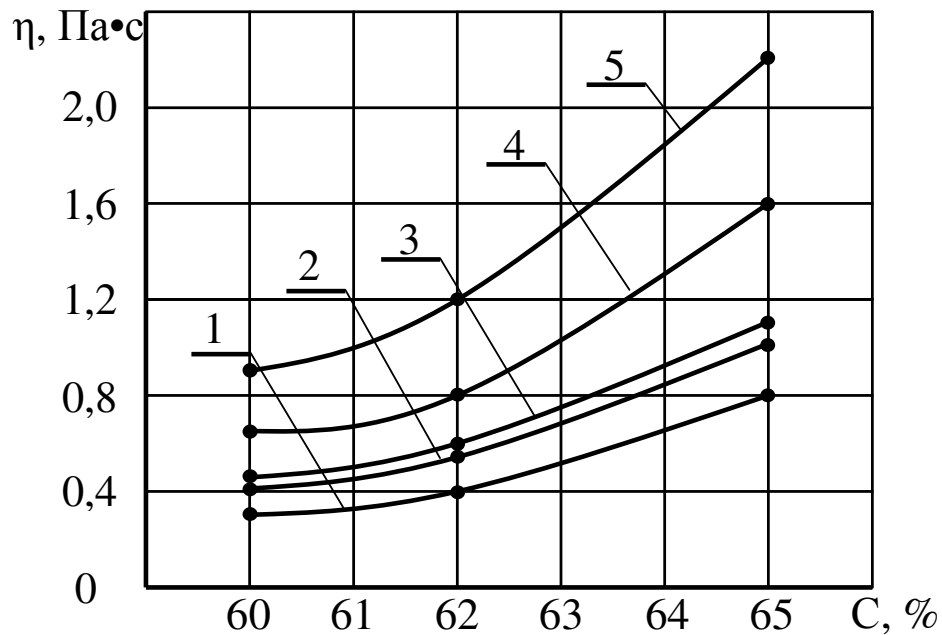
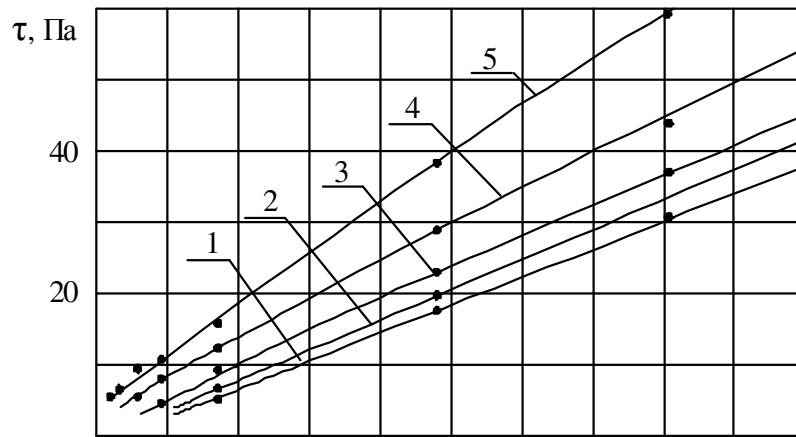


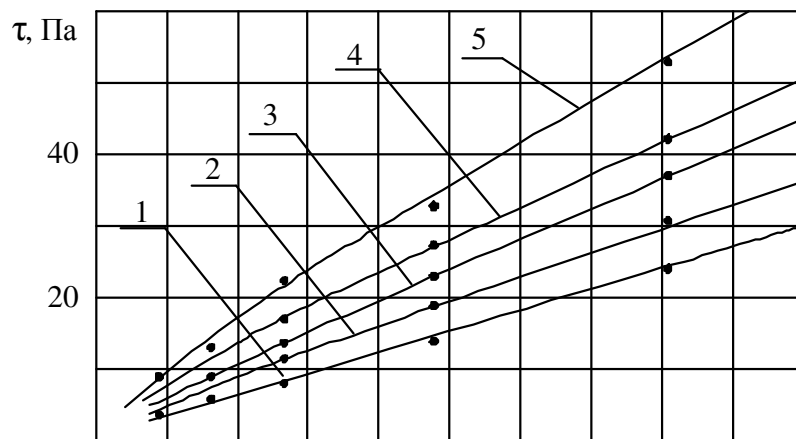
Рис. 1. Залежність ефективної в'язкості від масової концентрації і гранулометричного складу при  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$

Вихід класу (0,08-0,10) мм. становив відповідно для цих же варіантів 37,8 і 19,8%. Чітких критеріїв отримання та вибору гранулометричного складу вугілля у водовугільному паливі і, зокрема, оптимального вмісту в ньому колоїдних і найтонших частинок в існуючих джерелах інформації немає. При цьому не названа конкретно і визначальна група класів крупності, яка за різними даними може включати як клас 0-0,005 або 0-0,010 мм, так і 0-0,020, 0-0,40 і навіть 0-0,063 мм. Як правило, і гранулометричний склад мелючих тіл, і гранулометричний склад вугілля у водовугільному паливі, обрані і отримані в процесі експериментування і запатентовані різними авторами є предметом "know-how" розробника.

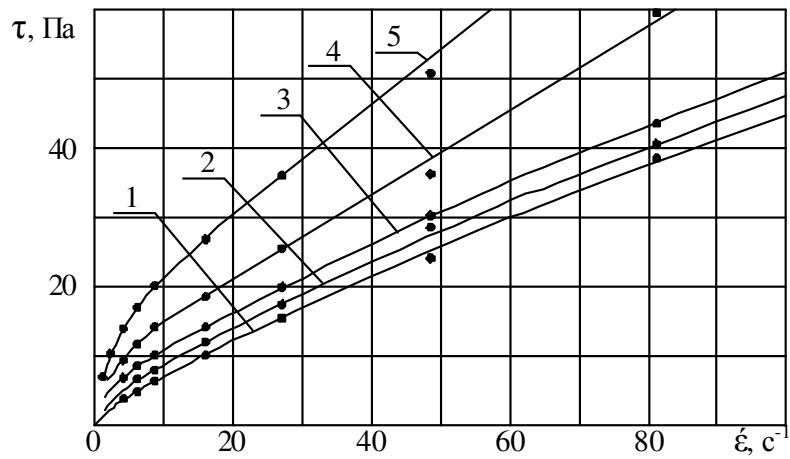
Порівняльна оцінка впливу гранулометричного складу мелючих тіл на вихід класу крупністю 0-0,02 мм в процесі подрібнення проведена в залежності від середньозваженого діаметра куль, що завантажуються у млин. Дані представлені у вигляді графіка на рис. 3. Цифри на графіку відповідають варіантам завантаження мелючих тіл.



а



б



в

Рис. 2. Залежність дотичних напружень від градієнта швидкості і гранулометричного складу:  
 1, 2, 3, 4 і 5 – при завантаженні кульового млина за варіантами I, V, III, II, IV;  
 а, б, в – при масовій концентрації ВВП 60, 62 і 65%

## Підготовчі процеси збагачення

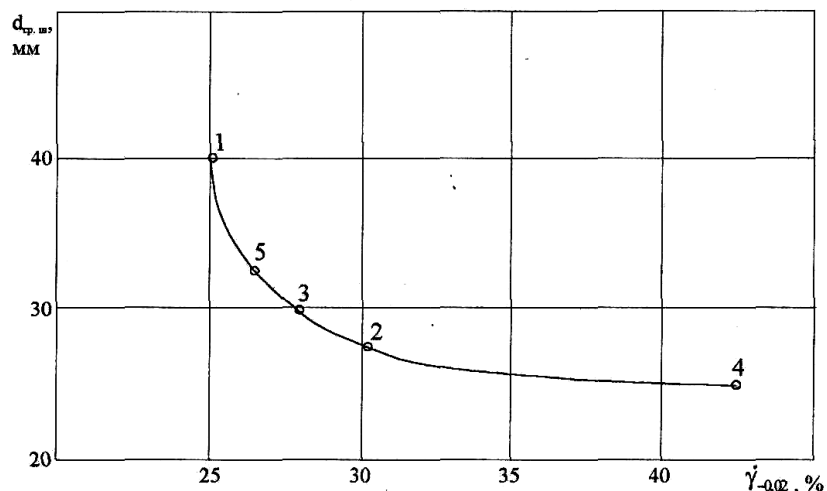


Рис. 3. Вихід класу 0-0,02 мм при різних варіантах (1–5) кульового завантаження млина

Аналізуючи наведені дані, можна відзначити наступне:

- вихід мікронних класів ( $- 20$  мкм) при інших рівних умовах збільшується в міру зменшення середньозваженого діаметра куль, завантажених у млин;
- при зменшенні середньозваженого діаметра куль з 40 до 25 мм, тобто в 1,6 рази, вихід класу  $- 20$  мкм збільшується з 25% до 42,5%, тобто в 1,7 рази;
- залежність  $\gamma_{-0,02} = f(d_{\text{ср.куль}})$  – нелінійна: при зменшенні середньозваженого діаметра куль з 40 до 27,5 мм вихід класу  $- 20$  мкм збільшився на 12%, а при зменшенні середньозваженого діаметра з 27,5 до 25 мм – на 14%;
- чітко виражена залежність  $\gamma_{-0,02} = f(d_{\text{ср.куль}})$  при практичній відсутності розкиду дослідних точок у кореляційному полі вказує коректність виконаних експериментів.

Подальша оцінка впливу гранулометричного складу вугілля, отриманого в результаті подрібнення його в кульовому млині при різних варіантах кульового завантаження, на якість і характеристики водовугільного палива здійснювалася на підставі седиментаційних і реологічних досліджень, в результаті виконання яких встановлено наступне.

Суспензія, отримана за варіантом I не відповідає вимогам, що висуваються до ВВП ні за максимальною крупністю, ні за седиментаційною стійкістю (термін зберігання не більше 1 доби), на графіку рис. 3 точка 1.

Дисперсна фаза водовугільної суспензії, підготовлена за варіантом IV, представлена вугіллям, крупність якого не перевищує 0,200 мм, а вміст класу 0-0,080 мм становить 80,2%. Така суспензія виключно стабільна, агрегативно стійка, не розшаровується протягом 30 діб. У дослідженому діапазоні зміни концентрацій від 60 до 65% агрегативна стабільність – не менше 15 діб. Однак, зміна реологічних параметрів суспензії у часі відбувається швидко і на 15-у добу після зберігання в'язкість при швидкості зсуву  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  і концентрації суспензії  $C = 62\%$  збільшується в 5 разів, а подальше її зберігання призводить до повної втрати плинності. У даному випадку, очевидно, що перенасичення су-

## Підготовчі процеси збагачення

спензії колоїдними частинками викликає різку зміну її реологічних властивостей. Причини цього явища потребують окремого теоретичного аналізу.

Оцінюючи седиментаційні, агрегативні та реологічні характеристики водовугільного палива, отриманого на основі вугілля з гранулометричним складом за варіантами II, V (серединні значення виходу класу 0-20 мкм, точки 2, 3, 5 на графіку рис. 3) можна відзначити наступне. Суспензія, приготована з використанням вугілля з гранулометричним складом за варіантом II, має нестабільні реологічні властивості: ефективна в'язкість при масовій концентрації  $C = 62\%$  через три доби зберігання збільшується на 50-60%, тобто варіант II тяжіє до варіанту IV. Суспензія, приготована по варіанту V не має седиментаційної стабільності, розшаровується протягом нетривалого часу, утворюючи щільний, в'язкий, важко розмішувемий осад в нижній частині ємності, що практично виключає використання її в якості стабільного палива (варіант аналогічний варіанту I).

### Висновки

Оптимальний гранулометричний склад ВВП, що забезпечує високий ступінь концентрації водовугільного палива (а, отже, і його високу теплотворну здатність), високу стабільність реологічних характеристик, седиментаційну і агрегативну стійкість одержуємо при подрібненні за варіантом III. Співвідношення між кулями при кульовому завантаженні в цьому випадку повинно бути наступним: 60% куль діаметром 40 мм, 20% – діаметром 20 мм і 20% діаметром 10 мм. Дослідження переконливо показують, що в процесі приготування водовугільного палива, як недоподрібнене вугілля, так і переподрібнене може істотно, у тому числі і негативно впливати на його технологічні характеристики.

### Список літератури

1. **Мурко В.И.** Научные основы процессов получения и эффективного применения водугольных суспензий: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Ин-т горючих ископаемых. – М., 1999. – 48 с.
2. **Круть О.А., Папаяні Ф.О., Козиряцький Л.Н.** Підвищення концентрації водовугільного палива при зменшенні енергоємності виготовлення // Зб. наукових праць ДонНТУ, сер. Гірничо-електромеханічна. – 2005. – Вип. 101. – С. 154-161.
3. **Круть А.А., Папаяні Ф.А.** Повышение энергетического потенциала водугольного топлива за счет рационального выбора пластифицирующих химических добавок // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2000. – С. 113-125.
4. **Білецький В.С., Круть О.А., Світлий Ю.Г.** Рациональное подрібнення вугілля у технології виготовлення водовугільного палива // Зб. наукових праць ДНТУ: Сер. Електротехніка та енергетика. – 2008. – Вип. 45(131). – С. 27-39.

© Світлий Ю.Г., Круть О.А., Білецький В.С., 2011

*Надійшла до редколегії 12.09.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко*