

УДК 622.693.4

**РАЦІОНАЛЬНЕ ПОДРІБНЕННЯ ВУГІЛЛЯ У ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

Білецький В.С., докт. техн. наук, проф.,  
Круть О.А., канд. техн. наук,  
Світлий Ю.Г., канд. техн. наук  
Донецький національний технічний університет,  
НВО «Хаймек»

*Розглянута проблема раціонального подрібнення вугілля при приготування водовугільного палива. Обґрунтовано використання при підготовці до подрібнення вугілля операцій „зволоження-перемішування”, що обумовлює дію „ефекту Ребіндера”.*

*Problem of rational coal grinding up attached to preparation of water-coal fuel considered. Shown use expediency attached to preparation to grinding up of coal damping-interfusion operations, that stipulates Rebinders-effect action.*

**Проблема та її зв'язок з науковими або практичними задачами.** Збільшення видобутку вугілля та погіршення його якості призводить до підвищення обсягу збагачення і, відповідно, до збільшення обсягу відходів збагачення у шламонакопичувачах, що створює серйозну екологічну загрозу. На той же час, накопичені у шламовідстійниках відходи збагачення мають досить великий енергетичний потенціал і порівняно просто можуть бути перетворені у джерело дешевих енергоносіїв, тобто у джерело прибутку.

Досвід світової практики свідчить про те, що найвигіднішим способом утилізації обводнених вугільних шламів є виготовлення на їх основі водовугільного палива (ВВП) для використання у теплоенергетиці. Його універсальність полягає в тому, що водовугільне паливо може бути виготовленим з твердого палива всього ряду метаморфізму від бурого вугілля до антрациту та відходів їх збагачення, його можна спалювати у топках котлів всіх типів як основне або допалювальне паливо.

Призначення водовугільного палива та технологія використання визначають його споживчі властивості і отже й особливості технології виготовлення. Проте, при всіх інших рівних умовах, основною технологічною операцією виготовлення водовугільного па-

лива є подрібнення вихідного продукту з метою забезпечення заданого гранулометричного складу.

Саме гранулометричний склад вихідного вугілля дає можливість досягнення високої концентрації і, відповідно, високого енергетичного потенціалу водовугільного палива, забезпечить належну текучість, якість розпилювання і, як наслідок, повноту вигорання органіки палива. Гранулометричний склад твердої фази водовугільної суспензії забезпечує потрібну тривалість її седиментаційної стабільності та належну агрегативну стійкість.

Таким чином, гранулометричний склад вихідного продукту виготовлення водовугільного палива є основною характеристикою, яка визначає його споживчі властивості та теплотехнічні, реологічні характеристики та седиментаційні характеристики [2-4].

**Мета нашої роботи** – пошук і дослідження раціональних способів подрібнення вугілля в технології приготування водовугільного палива.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Відомо, що гранулометричний розподіл тонкоподрібненого за допомогою будь-якого механічного засобу твердого матеріалу краще за все задовольняє експоненціально-степеневому рівнянню Розина-Раммлера [1]:

$$R_d = 100e^{bd^n},$$

де  $R_d$  – сумарний залишок на ситі з розміром отворів  $d$  мм, %;  $b$  та  $n$  – параметри, які залежать від крупності та механічної міцності твердого матеріалу, що піддають подрібненню. Після подвійного логарифмування ця закономірність приймає вигляд прямої лінії (рис.1).

Наші попередні дослідження [2, 3], а також теоретичні роботи [4] свідчать про існування тісної залежності реологічних характеристик висококонцентрованої водовугільної суспензії, її стабільності від гранулометричного складу.

**Постановка задачі.** У рамках даної роботи ми ставимо задачу обґрунтування доцільності використання при підготовці до подрібнення операцій „зволоження-перемішування” вугілля, що обумовлює дію „ефекту Ребіндера”, і експериментальну перевірку такого способу підготовки вугілля до подрібнення.

**Викладення матеріалу та результати досліджень.**

Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що для виготовлення водовугільної суспензії максимально можливої

концентрації треба подрібнювати вугілля до гранулометричного складу максимального упакування, який у першому наближенні описує формула Альфреда

$$CRFT = \left[ \frac{D_{\mu}^n - D_S^n}{D_i^n - D_S^n} \right] \cdot 100,$$

де CRFT – сумарний масовий вміст частинок твердого матеріалу менше заданої крупності, %;  $\mu$  – розмір частинки, мкм;  $D_i$  – розмір найкрупнішої частинки, мкм;  $D_S$  – розмір найменшої частинки, мкм;  $n$  – показник степеню, який характеризує розподіл частинок всередині сукупності. Найкращі результати з щільності упакування для вугілля отримано при  $n = 0,3-0,5$ .

Гранулометричний склад за формулою Альфреда припускає наявність у продукті подрібнення від 5 до 20 % колоїдних частинок, крупність яких не

перевищує 0,003 мм, які знаходяться у дефлокульованому стані та перешкоджають осіданню більш крупних частинок при русі потоку у ламінарному режимі. Але, водночас, сприяючи текучості суспензій, вимагають суттєвих енерговитрат на їх утворення. Очевидно, що на практиці подрібнювати вугілля до такого стану дуже важко.

Виходячи з цієї обставини різними фахівцями запропоновано стосовно до конкретних умов виготовлення та використання кількох моделей гранулометричного складу вихідного продукту, який забезпечує виготовлення водовугільного палива високих концентрацій. Всі ці моделі є “know-how” дослідників та мають одну загальну властивість – бімодальність, що забезпечується шляхом двостадійного по-

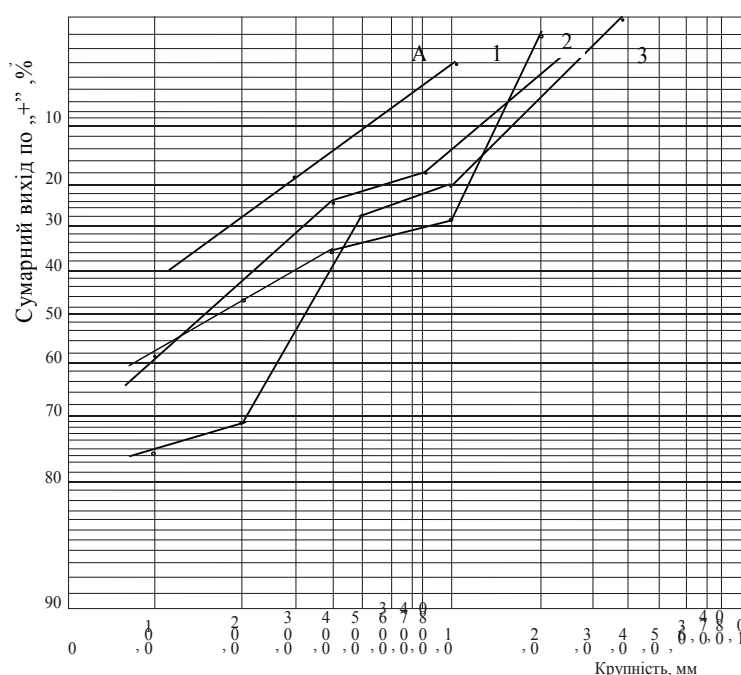


Рис. 1. Гранулометричне розподілення вихідного вугілля марки «Г»: А – одноmodalний склад; 1, 2, 3 – біmodalні склади..

мелу у кульових, вібраційних та стержньових млинах, змішуванням у різних співвідношеннях крупних та дрібних продуктів двох або кількох помелів з одночасним видаленням із загальної сукупності одного або кількох середніх класів крупності.

Відомо, що термодинамічно стійкі просторові структури різного роду суспензійних середовищ, як правило, обумовлені високою дисперсністю та підвищеною концентрацією твердої фази. Імовірність та швидкість утворення тиксотропних структур збільшуються із збільшенням дисперсності вихідного твердого матеріалу. Таким чином, підвищуючи або зменшуючи дисперсність частинок твердого матеріалу можна керувати структурно-механічними властивостями дисперсних систем. Враховуючи, що утворення на поверхні частинок твердого матеріалу адсорбційного шару є одним з факторів стабілізації системи, можна шляхом регулювання дисперсності твердої фази змінювати частку структурованої у граничних шарах адсорбційної вологи.

Таким чином, основним процесом технології виготовлення водовугільного палива (висококонцентрованої вугільної суспензії) є подрібнення вугілля, тобто доведення твердої фази до такого стану за крупністю та гранулометричним розподіленням, яке забезпечує не лише високий енергетичний потенціал, а й прийнятні, кондиційні структурно-реологічні та технологічні параметри.

Процес тонкого подрібнення, як відомо, один з найбільш енергоємних при попередній переробці мінеральної сировини. Так, при найбільш розповсюдженому у технології ВВП двостадійному мокрому помелі у кульовому та стержньовому млинах, що у найбільшій мірі забезпечує бімодальне гранулометричне розподілення продукту помелу, на одну тонну вугілля марки „ГД” витрачають від 90 до 110 кВт·год електричної енергії.

Виходячи з цих обставин та маючи на увазі зменшення енергоємності виготовлення водовугільного палива у 1,5-2 рази при підвищенні або збереженні споживчих властивостей, нами було запропоновано і досліджено такий технологічний варіант.

Відомо, що при зволоженні кам'яного вугілля міцність його знижується на 18-20 %. Ще більшого позитивного ефекту (зниження міцності вугілля мінімум у 2 рази) можна досягти у разі насичення вугільної маси розчинами поверхнево-активних речовин, тобто використовуючи так званий „ефект Ребіндера”, який полягає у адсорбційному зниженні міцності. Молекули поверхнево-активних речовин

проникають у зону попереднього руйнування (напр. до вершини тріщини) та зменшують витрати енергії на утворення нової поверхні. Сутність «ефекту Ребіндера» полягає у дії „розклинюючого тиску” у мікротріщинах, за рахунок чого робота, яка витрачається на утворення одиниці нової зовнішньої поверхні, суттєво зменшується. Акт адсорбції, при цьому, має відбуватися одночасно з актом розриву зв'язків у момент утворення нової елементарної чарунки поверхні, тобто для адсорбційного зниження міцності необхідним та обов'язковим є поєднання дії середовища та механічних напружень.

Враховуючи, що адсорбція поверхнево-активних речовин супроводжується сольватацією поверхні, що призводить до появи позитивного розклинювального тиску та розвитку нових мікротріщин, подальше руйнування тіла відбувається під дією невеликих механічних навантажень. Крім того, зволоження вугільної маси сприяє зниженню її міцності не лише за рахунок «ефекту Ребіндера», але й за рахунок часткового виділення при руйнуванні макромолекули вугілля кристалізаційної вологи.

Все це дозволяє припустити, що „ефект Ребіндера” у технології виготовлення водовугільного палива може бути успішно реалізований, якщо тривалість контакту подрібнюваного вугілля з водою буде достатньою. При цьому одним з варіантів є включення у технологічний ланцюжок операції перемішування зволоженого вугілля.

З метою порівняння помелу вугілля з попереднім перемішуванням зволоженого вугілля у спеціально створеному живильнику-змішувачі із шнековим виконавчим органом і без перемішування нами було проведено дослідження виготовлення водовугільного палива на основі вугілля марки „Г” після подрібнення у молотковій дробарці до крупності 0-3 мм зольністю  $A^d = 16,5 \%$  при вологості  $W_t^f = 12,0 \%$ . Як хімічна домішка було використано суперпластифікатор «Дофен» (1% на суху масу). Виготовлене водовугільне паливо оцінювалося по гранулометричному складу, реологічних показниках та седиментаційній стійкості. Гранулометричний склад вихідного вугілля наведено у табл. 1

Масова концентрація водовугільного палива складала в обох випадках  $C = 62,0 \%$ .

Принципова технологічна схема вузла подрібнення з попереднім перемішуванням компонентів подана на рисунку 2.

Гранулометричні склади продукту помелу у кульовому млині з попереднім перемішуванням і без перемішування наведено у табл.2.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад вихідного вугілля

Класи крупності, мм	Вихід класу, %	Сумарний вихід класів, %
+ 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
Усього:	100,0	

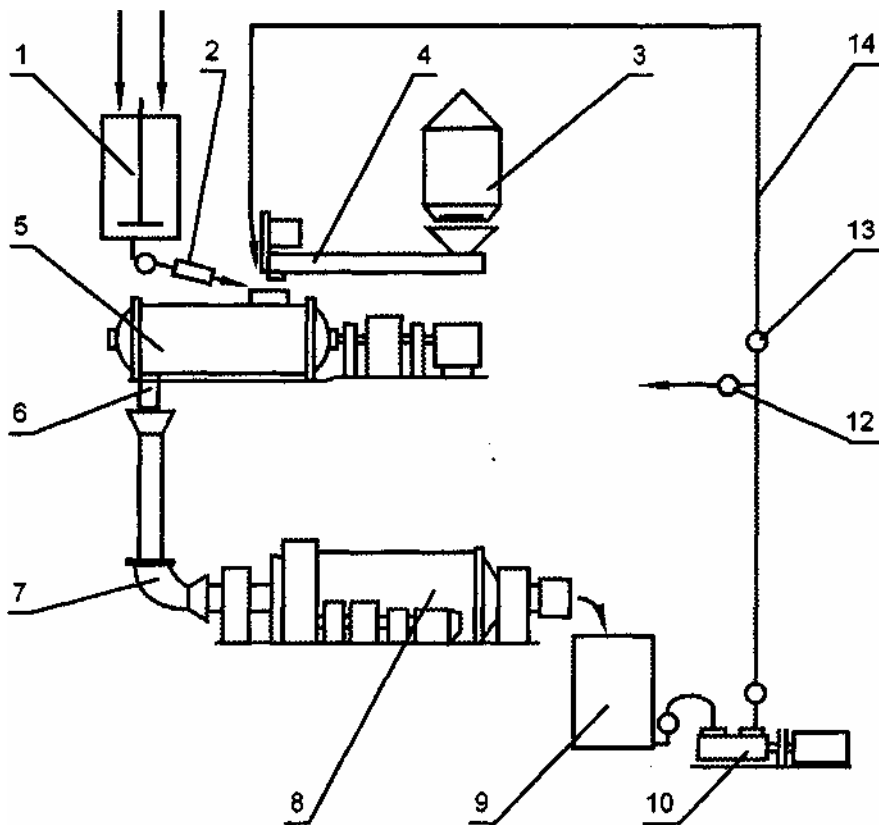


Рис. 2. Принципова технологічна схема подрібнення вугілля з попереднім змішуванням компонентів: 1 - ємність для диспергуючого середовища; 2 - регулятор подачі диспергуючого середовища; 3 - пересувний бункер подрібненого вугілля; 4 - шнековий живильник; 5 - живильник-змішувач; 6 - регулювальна засувка; 7 - завантажувальний пристрій; 8 - кульовий млин; 9 - приймальна ємність; 10 - гвинтовий насос; 11 - трубопровід кондиційного палива; 12, 13 - засувки; 14 - трубопровід некондиційного палива.

Таблиця 2 – Гранулометричні склади продукту помелу у кульовому млині з попереднім перемішуванням і без перемішування

Класи крупності, мм	Без попереднього перемішування		З попереднім перемішуванням	
	Вихід класу $\gamma$ , %	Сумарний вихід, $\Sigma\gamma$ %	Вихід класу $\gamma$ , %	Сумарний вихід, $\Sigma\gamma$ %
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	100,0	63,10	100,0
Усього	100,0	–	100,0	–

Аналіз наведених у таблиці даних показує, що у першому випадку (без попереднього перемішування) вміст класу + 0,1 мм складав 24,35 %, а у другому – 11,8 %. Відповідно класу 0-0,04 мм 52,92 % проти 63,1 %, а класу – 0,02 мм 24,0 % проти 29,3 %. Порівняння одержаних даних дослідження обох варіантів дає підставу припустити, що водовугільне паливо, виготовлене на основі продукту помелу без попереднього перемішування може характеризуватися агрегативною нестабільністю та седиментаційною нестійкістю внаслідок недостатнього вмісту в ньому тонкодиспергованих частинок і підвищеного виходу класу + 0,1 мм.

Отже отримання кондиційного водовугільного палива на основі вихідного вугілля подрібненого без попереднього перемішування вимагає зміни режиму роботи або підключення другого млина, тобто роботи з двостадійним помелом.

Графічні залежності дотичних напружень та ефективної в'язкості від градієнта швидкості наведено на рис. 3.

Аналіз даних, наведених на рис. 3 та у табл. 2 свідчить про те, що величина дотичних напружень  $\tau$  (Па) у розглядаємих варіантах залежить не лише від градієнта швидкості, а й від вмісту у вихідному вугілля тонкодиспергованих частинок. У діапазоні градієнта швидкості  $\dot{\epsilon} = 9\text{--}50 \text{ с}^{-1}$  при збільшенні вмісту частинок крупністю – 0,04 мм від 52,9 до 63,1% величина дотичних напружень збільшується в середньому на 28%. Відповідно до того збільшується величина ефективної в'язкості, що, зокрема, сприяє транспортуванню водовугільного палива трубопроводами гідротранспортних систем.

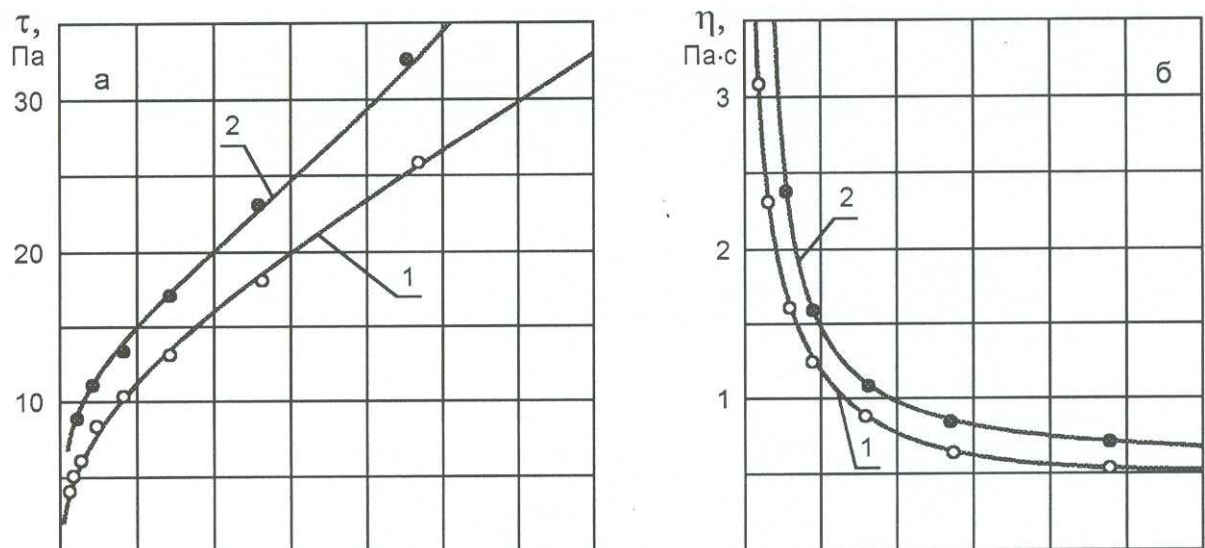


Рис. 3. Залежність дотичних напружень (а) та ефективної в'язкості (б) від градієнта швидкості: 1, 2 – подрібнення без попереднього перемішування та з попереднім перемішуванням, відповідно.

Реологічні та седиментаційні характеристики водовугільного палива і його агрегатний стан у перший період після виготовлення є цілком задовільними в обох технологічних варіантах. Проте із збільшенням терміну зберігання седиментаційна стабільність та агрегатна стійкість водовугільної суспензії, виготовленої без попереднього перемішування суттєво знижуються, що можна пояснити незбалансованістю розподілення у сукупності дисперсної системи колоїдних, дрібних та відносно крупних частинок.

Водовугільне паливо з масовою концентрацією  $C = 62\%$ , яке виготовлене за технологією з попереднім перемішуванням, не розшаровується як мінімум протягом 10–12 діб. При збільшенні масової концентрації водовугільного палива до 65% його статична стабільність сягає 15–16 діб. При цьому у контрольному циліндрі спостерігається лише незначне перерозподілення вугілля як по концентрації так і по гранулометричному складу. Реологічні характеристики водовугільного палива відновлюються після нетривалої гомогенізації (наприклад, у відцентровому насосі).

Порівняльну оцінку основних властивостей та параметрів водовугільного палива, виготовленого з попереднім перемішуванням (варіант 2) та без нього (варіант 1) можна зробити на основі даних, наведених у табл. 3.



Таблиця 3 - Порівняльна оцінка основних параметрів водовугільного палива

Параметри		Тривалість зберігання, годин					
		0	24	72	120	240	360
Дотичне напруження зсуву (Па) при $\dot{\epsilon} = 9 \text{ c}^{-1}$	Варіант 1	10,5	12,5	13,6	14,2	16,0	16,2
	Варіант 2	13,5	13,4	13,5	13,6	13,6	13,6
Ефективна в'язкість (Па·с) при $\dot{\epsilon} = 9 \text{ c}^{-1}$	Варіант 1	1,17	1,39	1,51	1,58	1,78	1,80
	Варіант 2	1,50	1,49	1,50	1,51	1,51	1,51
Статична стабільність, %	Варіант 1	100	96,8	90,8	85,0	74,6	66,7
	Варіант 2	100	100	100	100	99,6	98,8

Аналіз наведених у табл. 3 даних свідчить про те, що реологічні параметри водовугільного палива, виготовленого з попереднім перемішуванням композиційних компонентів у процесі експериментальних досліджень залишалися практично незмінними.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що попереднє перемішування-зволоження компонентів перед завантаженням кульового млина за інших рівних умов дає можливість отримання більш тонкого помелу та суттєво збільшити вихід класів, які визначають реологічні характеристики та агрегатний стан водовугільної суспензії.

Різноманітність умов використання водовугільного палива допускає можливість розширення діапазону вимог у бік пом'якшення не лише топочних, але й реологічних та седиментаційних характеристик. Виходячи з цих обставин нами було проведене дослідження технології мокрого помелу у кульовому млині в одну стадію. За об'єкт досліджень було прийнято концентрат вугілля марки „Г” крупністю 0-13 мм, подрібнений у молотковій дробарці до крупності 0-3 мм, зольністю на суху масу  $A_d = 16,5 \%$  та вологістю на робочу масу  $W_t' = 7-9 \%$ . Вихідний гранулометричний склад вугілля перед помелом наведено у табл. 1.

У процесі досліджень було простежено гранулометричне розподілення продукту помелу для п'яти варіантів кульового завантаження (табл. 4).

Гранулометричний склад вугілля перед помелом наведено у табл. 5. Гранулометричний склад продукту помелу у кульовому млині з попереднім перемішуванням-зволоженням і завантаженням млина по варіантах табл. 4 наведено у табл. 6.

Таблиця 4 - Гранулометричне розподілення продукту помелу

Варіанти завантаження	Гранулометричний склад кульового навантаження млина, %			
	Діаметр куль, мм			Середньозважений діаметр, мм
	40	20	10	
1	100	–	–	40,0
2	50	25	25	27,5
3	60	20	20	30,0
4	40	30	30	25,5
5	70	15	15	32,5

Таблиця 5.

Крупність, 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
Вихід класів, %	0,76	7,71	19,52	14,24	12,35	10,24	4,41	30,77

Таблиця 6.

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
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

Наведені у табл. 6 дані свідчать про те, що гранулометричні склади кінцевих продуктів при різних варіантах помелу суттєво розрізняються. Вихід класу 0-0,02 мм, який власне і визначає вміст колоїдних частинок складає від 25 % (варіант I) до 42,5% (варіант IV). Залишок на контрольному ситі 0,09 мм складає 37,8% (варіант I) і 19,8% (варіант IV).

Як свідчать результати проведених нами досліджень гранична крупність вугільних частинок при спалюванні водовугільного палива у топках котлів побутового та промислового призначення не може

перевищувати 0,35 мм. Таким вимогам водовугільне паливо, виготовлене за варіантом I, не відповідає.

На рис. 4-5 наведено залежності дотичних напружень від градієнта швидкості  $\dot{\epsilon}$  та гранулометричного складу твердої фази водовугільних суспензій при різних масових концентраціях, які свідчать про те, що з точки зору енергоємності гідротранспорту найбільш придатним варіантом подрібнення є перший. Далі за мірою погіршення реологічних характеристик йдуть V, III, II та IV варіанти. При цьому у будь-якому випадку незалежно від гранулометричного складу твердої фази та концентрації суспензії криві течії  $\tau = f(\dot{\epsilon})$  мають псевдопластичний характер.

У діапазоні параметрів, прийнятого в наших дослідженнях, зміна масової концентрації водовугільної суспензії від 60 до 65 % помітного впливу на процес подрібнення не спричиняє.

Залежність ефективної в'язкості від масової концентрації водовугільної суспензії та гранулометричного складу твердої фази свідчить про те, що найбільш придатні реологічні характеристики мають суспензії, приготовлені за варіантами I, V та III (рис. 5, 6, криві 1,2,3). У цьому випадку навіть при відносно високому насиченні суспензії (до 65 %) ефективна в'язкість при градієнті швидкості  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$  не перевищує 1,1 Па·с, що цілком задовольняє вимогам.

Проте, як показали подальші дослідження, не всі виготовлені за варіантами I – V водовугільні суспензії задовольняють вимогам по седиментаційній стабільності та агрегативній стійкості, а також стабільності реологічних властивостей. Так, наприклад, розшарування водовугільної суспензії, виготовленої за варіантом I відбувається вже протягом першої доби зберігання з утворенням дуже в'язкого донного осаду.

Через троє діб зберігання починається розшарування суспензії, яку виготовлено за варіантом V.

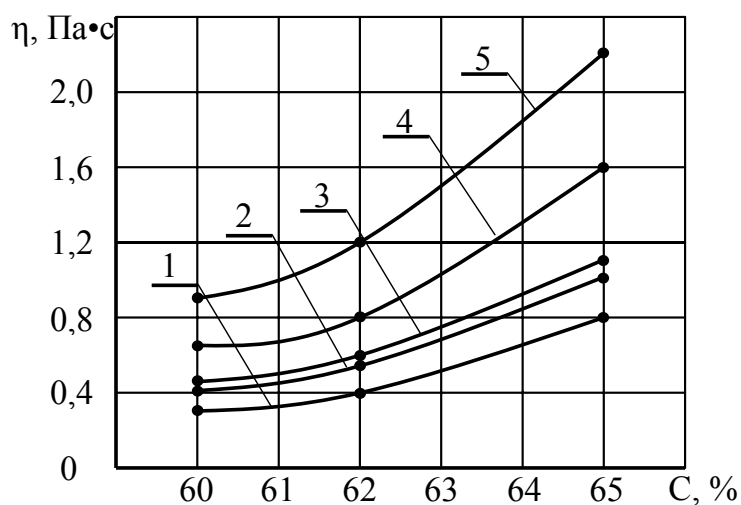


Рис.4 Залежність ефективної в'язкості від масової концентрації та гранулометричного складу при  $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$ .

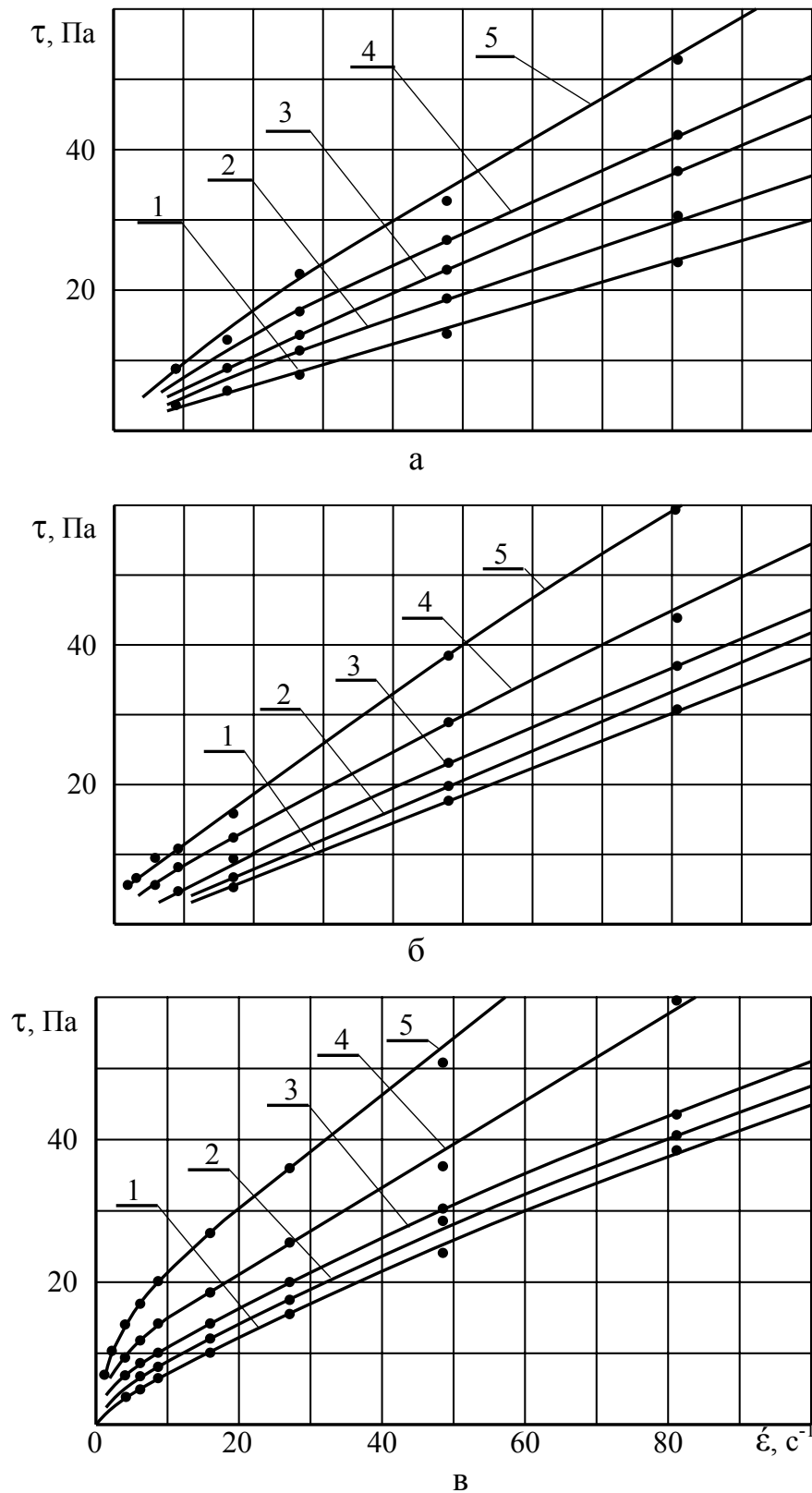


Рис. 5 Залежність дотичних напружень від градієнта швидкості та гранулометричного складу дисперсної фази: 1,2,3,4,5 - при завантаженні кульового млина за варіантами I, V, III, II, IV; а, б, в - при масовій концентрації суспензії 60, 62 и 65 %

Аналіз залежностей, наведених на рис.6, свідчать про дуже незначні зміни ефективної в'язкості водовугільних суспензій, виготовлених за варіантами I, V, III, у залежності від тривалості зберігання.

Проте, суспензії, які виготовлено за варіантами I та V, як це було зазначене вище, не відповідають вимогам по агрегативній стійкості. Водовугільне суспензії, які виготовлено за варіантами II та IV не придатні до практичного споживання внаслідок суттєвого підвищення величини ефективної в'язкості у процесі зберігання.

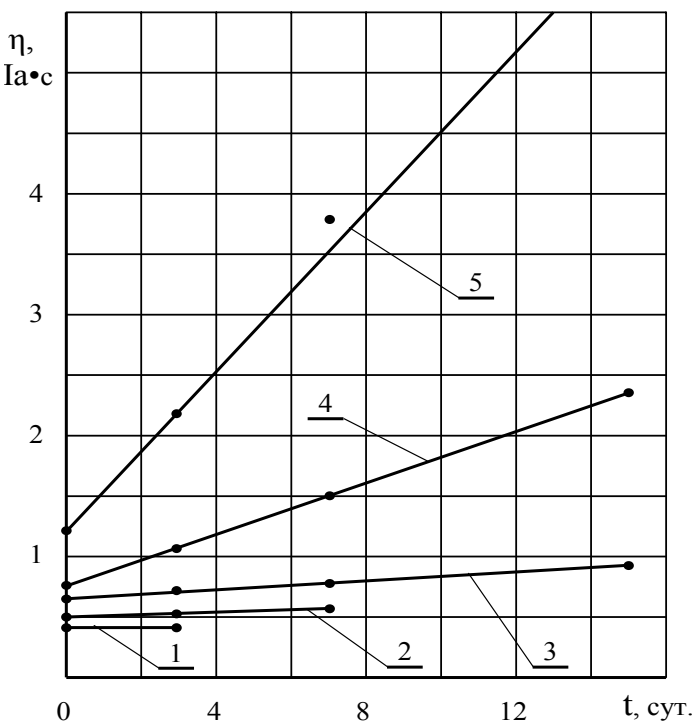
**Висновки, напрямки подальших досліджень.**

Виконані дослідження, показують, що при помелі у кульовому млині в одну стадію із завантаженням кулями певного гранулометричного складу і попередньою операцією "зволоження-перемішування" компонентів можна отримати висококонцентровану вугільну суспензію з задовільними теплотехнічними, реологічними та седиментаційними характеристиками.

Водовугільне паливо, виготовлене з використанням запропонованих технічних рішень, відповідає всім технічним вимогам, і може бути використаним як основне та допалювальне паливо у топках котлів малої та середньої паропродуктивності.

Перелік джерел.

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра. – 285 с.
2. Білецький В.С., Круть О.А., Власов Ю.Ф. Реологічні характеристики вугільних суспензій у залежності від якості вихідного вугілля. // Вісник Криворізького технічного університету, вип. 11.– Кривий Ріг.–2006.–с. 49-55.
3. Білецький В.С., Круть О.А., Власов Ю.Ф. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля // Науковий вісник Національного гірничого університету, № 6.–Дніпропетровськ.–2006.–с. 46-49.
4. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов.- М.Химия.–1988.– 256 с.



1, 2, 3, 4, 5 – при завантаженні розмелювальних куль за варіантами I, II, III, IV, V відповідно.

Рис.6. Залежність ефективної в'язкості від терміну зберігання та гранулометричного складу.

Дата поступления статьи в редакцию: 01.11.07