УДК 544.7 : 662.758

А.С.Макаров, Д.Ю.Садовський*, К.В.Макарова, О.І.Єгурнов

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОРГАНОВОДОВУГІЛЬНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ПРИРОДНОГО ВУГІЛЛЯ

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В.Думанського НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 42, Київ, 03142, Україна*

** e-mail: arkraa@gmail.com*

У результаті вивчення реологічних властивостей суспензій вугілля у водно-гліцероловому дисперсійному середовищі встановлено, що з підвищенням стадії метаморфізму вугілля, тобто при переході від бурого вугілля до антрациту, суспензії характеризуються меншими значеннями ефективної в'язкості при однаковому масовому вмісті дисперсної фази. Визначено залежність гранулометричного складу суспензій вугілля від концентрації гліцеролу. Отримано суспензії на основі вугілля різного ступеня метаморфізму з використанням як дисперсійного середовища гліцеролу, продуктів піролізу високомолекулярних полімерів та води у різних співвідношеннях з максимальним вмістом вугілля 60 % мас. і допустимою в'язкістю (до 1.5 Па·с) з високою калорійністю та седиментаційною стійкістю (не менше 8 діб).

К л ю ч о в і с л о в а: органовугільна суспензія, реологічні характеристики, гліцерол, продукти піролізу, утилізація відходів.

ВСТУП. У зв'язку з високими обсягами використання вугілля є актуальним питання більш ефективного застосування цього виду палива та зниження шкідливого впливу продуктів згорання на навколишнє середовище. Одним з перспективних напрямків є використання висококонцентрованих водовугільних суспензій (ВВС). Однак поряд з явними екологічними перевагами ВВС порівняно з вугіллям вони мають більш низьку теплоту згорання через воду в їх складі [1–4]. Зазначені недоліки можна усунути, замінивши частину дисперсійного середовища (води) недорогими енергоносіями — органічними відходами промисловості, що мають досить високу теплоту згорання і низьку температуру застигання. Такий підхід до створення суспензійного палива, на відміну від водовугільних суспензій, дозволяє отримувати більш калорійне суспензійне паливо. Одержані паливні дисперсні системи характеризуються наступними перевагами порівняно з вугіллям та водовугільним паливом: меншою температурою запалювання; повнотою згорання; підвищеною ка-

лорійністю. Калорійність суспензійного палива дає змогу одержувати в пічному просторі температуру до 1500 °С, що зумовлює можливість дешевої утилізації рідких органовмісних відходів. При цьому суспензії з таким складом рідкої фази дозволять утилізувати відходи хімічної промисловості — рідкі органічні відходи різних промислових підприємств, зокрема нафтопереробних, полімерних, спиртових, коксохімічних, фармацевтичних, біопаливних [5, 6].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА. Вихідним матеріалом для отримання висококонцентрованих органоводовугільних суспензій було вугілля різного ступеня метаморфізму — марки Б (буре), ДГ (довгополуменеве газове), Г (газове), Т (пісне), А (антрацит), технічний та елементний аналіз якого наведено у табл. 1. Як видно з даних таблиці, характеристики вугілля різних марок дуже відрізняються, що ускладнює процес приготування дисперсних систем на їх основі. Але, незважаючи на це, необхідно досліджувати можливість отримання паливних суспензій для вугілля різного сту-

© А.С.Макаров, Д.Ю.Садовський, К.В.Макарова, О.І.Єгурнов, 2019

Т а б л и ц я 1

Технічний та елементний аналіз вугілля

Марка вугілля	Технічний аналіз, % мас.			Елементний аналіз, % на daf*				
	W ^a	Ad	Vdaf	C	H	N	O	S
Б	51.0	20.0	48.5	70.1	5.0	1.2	19.7	4.0
ДГ	9.3	22.3	43.8	76.2	4.9	1.1	13.7	4.1
Г	0.83	7.5	10.37	86.05	5.03	1.36	6.2	1.36
Т	5.1	25.0	14.9	88.5	3.8	0.7	5.3	1.7
А	3.2	10.5	3.8	95.7	2.3	0.4	1.1	0.5

* Паливо у сухому стані — умовний стан палива без вмісту вологи та мінеральної маси.

пеня метаморфізму, властивості яких також будуть відрізнятися [7–10].

Відомо, що вугілля є полікомпонентною гірською породою, яка складається з неоднорідної органічної маси, мінеральних включень різного складу та вологи. Всі компоненти, знаходячись у тісній взаємодії, утворюють дисперсну систему, яка і визначає фізико-хімічні та технологічні властивості вугілля. Модель хімічної структури органічної маси вугілля містить наступні структурні фрагменти: ароматичні конденсовані кільця, циклоалканові фрагменти, функціональні групи (–ОН, –COOH, –NH₂, –SH), алкільні замісники (C₁–C_n); зв'язки типу “місток”, які зв'язують різні фрагменти між собою (–(CH₂)_m–, –O–, –O–CH₂–, –NH–, –S–). З підвищенням стадії метаморфізму співвідношення структурних фрагментів змінюється, зокрема збільшується кількість конденсованих кілець і зменшується кількість функціональних груп, зв'язків типу “місток”, алкільних радикалів, циклоалканових фрагментів [11, 12]. Серед гетероатомів (N, O, S) в органічній масі низько- і середньометаморфізованого вугілля переважає кисень. При переході від бурого вугілля до антрациту знижується вміст кисню та підвищується вміст вуглецю. Відповідно по мірі зростання стадії метаморфізму відбувається підвищення теплотворної здатності вугілля.

Неорганічна складова вугілля представле-

на в основному глинистими мінералами (силікатами та алюмосилікатами), діоксидом кремнію, карбонатами Ca, Mg, Fe, сульфідами. Суттєву роль в невалентному зв'язуванні окремих компонентів вугілля відіграють взаємодії за участю органомінеральних структур. На стадії бурого вугілля значна частина кислотних груп знаходиться у зв'язаному стані у вигляді карбоксилатних комплексів лужних та лужно-земельних металів: AR–(C=O)–O–Ca–O(C=O)–AR; AR–(C=O)–O–Ca–O–(CH₂)_n–AR, а також Al, Si, Fe, Ni, Ti. Таким чином, можна стверджувати, що поверхня природного вугілля є “мозаїчною”, тобто на ній зустрічаються і гідрофільні, і гідрофобні ділянки. Гідрофільність вугілля в основному обумовлена наявністю функціональних груп, які приймають участь у формуванні водневих зв'язків. Гідрофільні групи зустрічаються на поверхні органічних і неорганічних фрагментів структури вугілля [11–13].

Реологічні параметри (напругу зсуву та в'язкість) суспензій визначали на приладі Rheotest-2 за допомогою вимірювальної системи S/S2 (коаксіальні гладкі циліндри) в діапазоні швидкостей зсуву 1.0–437.4 с^{–1} за стандартною методикою, яка додається до приладу. Як компонент дисперсійного середовища використовували воду і гліцерол виробництва ТОВ “Запорізький біопаливний завод” ($\eta = 1.49$ Па·с, $\rho = 1.263$ г/см³, $Q = 19.5$ МДж/кг) та продукти піролізу високомолекулярних полімерів ($\eta = 0.0046$ Па·с, $\rho = 0.936$ г/см³, $Q = 7.6$ МДж/кг).

З метою зменшення впливу фактора набухання вугілля реологічні параметри спиртовугільних суспензій визначали безпосередньо після приготування і гомогенізації. Помел вугілля, спільно з дисперсійним середовищем (гліцерол, продукти піролізу і вода), проводили в кульовому млині об'ємом 1 л. Початковий розмір часток вугілля становив ≤ 2 мм.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Оскільки основною енергетичною характеристикою палива є його теплотворна здатність, масова частка вугілля у складі паливних дисперсних систем має бути максимальною. Такі системи повинні бути стабільними в часі, з певними реологічними властивостями. Залежно від способу спа-

лювання паливних колоїдних дисперсних систем вимоги до їх реологічних властивостей будуть відрізнятися. В'язкість таких систем, визначена при швидкості зсуву, що відповідає ламінарному потоку ($Dr = 9 \text{ с}^{-1}$), складає 1.5 Па·с. Однак повна або часткова заміна водного дисперсійного середовища на органічне у процесі приготування паливних дисперсних систем на основі природного вугілля, приводить до формування принципово відмінних між собою дисперсних структур. Відмінності між дисперсними структурами, які формуються у водних та органічних середовищах, визначають стабільність та реологічну поведінку паливних дисперсних систем. Згідно з сучасними уявленнями, реологічну поведінку дисперсних систем розглядають як результат контактних взаємодій частинок дисперсної фази між собою та дисперсійним середовищем [8–11]. Відповідно відсоток наповнення паливних дисперсних систем вугільними частинками буде залежати від фізико-хімічних властивостей вугілля та рідких органічних середовищ, а також від контактних взаємодій між частинками вугілля на границі розділу фаз.

Використовуючи аналізатор лазерної дифракції Mastersizer 2000 (Malvern Instruments, Великобританія), ми визначили залежність гранулометричного складу суспензій вугілля від концентрації гліцеролу в них (рис. 1). Отримані дані демонструють збільшення кількості крупних частинок (50–70 мкм) в дисперсійній системі зі зростанням кількості гліцеролу в них, причому така тенденція має більш виражений характер після досягнення концентрації гліцеролу в суспензії понад 30 % мас., що вказує на збільшення кількості агрегованих частинок.

На гранулометричний склад колоїдних систем також мають вплив процеси взаємодії між частинками вугілля у водно-гліцероловому дисперсійному середовищі. Вугілля має амфіфільну поверхню, отже, гідрофільний гліцерол буде просочувати пори на поверхні вугілля, в першу чергу, під дією капілярних сил, а потім надлишок гліцеролу поступово покриватиме відносно більш гідрофільні ділянки вугілля, що, в свою чергу, може приводити до агрегації ча-

Рис. 1. Залежність гранулометричного розподілу частинок вугілля марки А від кількості гліцеролу в дисперсних системах. а: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20 % мас. б: 1 – 0; 2 – 30; 3 – 40 % мас.

стинок вугілля, причому цей процес має більш виражений характер зі зростанням кількості гліцеролу у дисперсійному середовищі.

У результаті вивчення реологічних властивостей суспензій вугілля з водно-гліцероловим дисперсійним середовищем було встановлено, що з підвищенням стадії метаморфізму вугілля та їх густини, тобто при переході від бурого вугілля до антрациту, суспензії характеризуються меншими значеннями ефективної в'язкості при однаковому масовому вмісті дисперсної фази (C_T , %) (рис. 2). Наприклад, 50 %-ві вугільні суспензії, дисперсійне середовище яких вміщує 5 і 20 % мас. гліцеролу, мають такі значення ефективної в'язкості: у випадку вугілля марки Б – 0.79 і 2.3, Г – 0.7 і 2.0, Т – 0.6 і 1.8,

Рис. 2. Залежність в'язкості суспензій вугілля марок Б (а) та Г (б) від концентрації дисперсної фази при вмісті гліцеролу в суспензії 5 (1), 10 (2), 15 (3) і 20 % мас. (4).

А — 0.5 і 1.78 Па·с. Криві для вугілля марок А і Т мають подібний характер, тому на рисунках не наводяться.

Загальновідомо, що ефективна в'язкість суспензій незалежно від способів і умов її вимірювання пропорційна в'язкості дисперсійного середовища. При цьому багато суспензій, призначених для промислового використання, мають певні обмеження за в'язкістю. Так, ефективна в'язкість суспензій вугілля, які спалюють факельним способом, зазвичай, не повинна перевищувати 1.5 Па·с [14]. Якщо в дисперсійному середовищі суспензії застосовуються дві або кілька рідин, величина і характер зміни в'язкості дисперсійного середовища, а також в'язкості суспензії, будуть визначатися, за інших рівних умов, їх відносним вмістом. У силу того, що міжмолекулярні взаємодії в сумішах рідин приводять до утворення різних за структурою асоціатів, в'язкість суміші може і збіль-

шуватися, і зменшуватися, залежно від її складу [15, 16]. Тому в процесі приготування суспензій вугілля з використанням як дисперсійного середовища сумішей рідин необхідно встановити оптимальне співвідношення компонентів, при якому ефективна в'язкість суспензій не перевищує порогового значення.

Рис. 3. Залежності в'язкості суспензій вугілля марок А (1), Т (2), Г (3) і Б (4) від вмісту гліцеролу при концентрації вугілля в системі $C_T = 50$ % мас.

Вимірювання в'язкості водно-гліцеролових суспензій вугілля показали, що для кожної марки вугілля існує своя гранична концентрація гліцеролу в дисперсійному середовищі, при якій в'язкість суспензій не перевищує 1.5 Па·с (рис. 3).

Досліджувані в даній роботі суспензії часто піддаються різним механічним впливам — перемішуванню, перекачуванню, розпиленню. Тому важливо розуміти, яким чином змінюються реологічні властивості дисперсної системи в широкому діапазоні механічних навантажень. Отримані залежності напруження зсуву від швидкості зсуву вказують на зміцнення структури суспензій вугілля з підвищенням вмісту в них гліцеролу (рис. 4, а–г). Графіки наведені для суспензій з максимальним вмістом дисперсної фази, оскільки концентрація вугілля визначає калорійність паливних дисперсних систем. У міру підвищення швидкості зсуву і руйнування структури суспензій вугілля криві течії "виположуються". При цьому кут нахилу кривих щодо осі абсцис зростає зі збільшенням концентрації гліцеролу ($C_{глі}$) у суспензії.

Внаслідок хімічної неоднорідності повер-

Рис. 4. Криві течії водно-гліцеролових суспензій вугілля різних марок: а — Б ($C_T=50\%$), б — Г ($C_T=55\%$); в — Т ($C_T=55\%$); г — А ($C_T=60\%$). Вміст гліцеролу в суспензіях: 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 % мас. (4).

хні вугілля міцність контактів, що виникають між частинками однієї і тієї ж дисперсної фази, може різко відрізнятися залежно від того, по яких ділянках поверхні реалізується контакт. З огляду на те, що реологічні властивості дисперсних систем "відображають" всю складну сукупність фізико-хімічних чинників, що впливають на процеси структуроутворення, слід згадати електростатичний фактор, роль якого полягає в зменшенні міжфазного натягу через виникнення подвійного електричного шару на поверхні частинок. При цьому формування одиниць зарядів на поверхні частинок дисперсної фази має запобігати їх агрегуванню в дисперсійному середовищі. Однак роль електростатичного фактора у відштовхуванні частинок слабшає при підвищенні концентрації гліцеролу в суспензіях вугілля, оскільки при цьому зменшується діелектрична проникність оточуючої їх рідкої фази. Більшою мірою на реологічні властивості суспензій вугілля впливають фізичні характеристики дисперсійного середовища. Підвищення в'язкості і зменшення діелектричної проникності водно-гліцеролових розчинів з ростом вмісту в них органічного компоненту приводить до підвищення напруги зсуву і в'язко-

сті суспензій вугілля, приготованих на основі цих розчинів. Важливу роль у зміні реологічних властивостей вугільних суспензій також відіграють процеси адсорбції і змочування. Порівняння адсорбції гліцеролу на різних за своєю природою поверхнях показало, що на вуглецевій поверхні гліцерол адсорбується набагато краще, ніж на поверхні глини [17]. Деякі джерела також вказують на те, що гідрофобні поверхні графіту [18] та низькозольного вугілля [19] краще змочуються гліцеролом, ніж водою.

Вірогідно, що у водно-гліцеролових середовищах відбувається вибіркова адсорбція молекул гліцеролу на гідрофобних ділянках поверхні частинок вугілля. Загалом, в результаті вирівнювання полярності фаз за рахунок різного роду взаємодій між молекулами дисперсійного середовища і гетерогенною поверхнею вугілля формується така коагуляційна структура суспензій, реологічні властивості якої залежать від концентрації гліцеролу у водному розчині. При цьому величина адсорбції гліцеролу з водних розчинів на гідрофобних ділянках поверхні вугілля визначатиме в'язкість не тільки вихідного розчину, але і суспензії в цілому.

Слід зазначити, що водно-гліцеролові су-

спензії вугілля не розшаровуються протягом тижня при зберіганні в статичних умовах навіть за відсутності стабілізуючих реагентів. При цьому водовугільні суспензії в тих же умовах є стабільними не більше доби. Структура осаду вугільних суспензій теж залежить від природи дисперсійного середовища. Якщо у систем із вмістом гліцеролу вона є досить рихлою, то у випадку з водовугільними суспензіями — щільною. В умовах герметичного зберігання в'язкість водно-гліцерових суспензій після розшарування легко відновити шляхом простого перемішування. Також перевагою приготування вугільних паливних дисперсних систем з вмістом гліцеролу є набагато вищі величини їх калорійності, порівняно з водовугільними. Нами були розраховані значення калорійності та реологічні характеристики гліцероводовугільних суспензій з різним вмістом гліцеролу (табл. 2). Отже, приготування таких дисперсних систем дозволяє отримувати калорійне паливо без використання хімічних реагентів та утилізувати відходи виробництва біодизельного пального — сирий, неочищений гліцерол.

В якості складової дисперсійного середовища паливних дисперсних систем на основі вугілля різного ступеня метаморфізму нами запропоновано використовувати рідку фазу продуктів піролізу високомолекулярних полімерів. Теплота згорання та в'язкість таких паливних органоводовугільних дисперсних систем показані у табл. 3.

Дані паливні дисперсні системи мають високу стабільність та калорійність, яка при високому вмісті твердої фази та продуктів піролізу близька до вихідного вугілля або перевищує її. При цьому отримані

Т а б л и ц я 2

Нижча теплота згорання (Q , МДж/кг) та в'язкість (η , Па·с) органоводовугільних суспензій (ОВС) на основі вугілля різного ступеня метаморфізму з різним вмістом гліцеролу

C_T	$C_{гг}$	C_{H_2O}	Б		Г		Т		А	
%			Q	η	Q	η	Q	η	Q	η
45	0	55	7.20	1.55	10.35	1.49	11.12	1.47	12.96	1.41
	5	50	9.83	0.87	11.99	0.61	13.21	0.54	14.78	0.45
	10	45	10.66	0.97	12.82	0.65	14.04	0.57	15.61	0.49
	15	40	11.49	0.98	13.65	0.68	14.87	0.60	16.44	0.53
	20	35	12.32	0.99	14.48	0.73	15.70	0.65	17.27	0.58
50	0	50	8.00	1.69	11.50	1.52	12.35	1.46	14.40	1.39
	5	45	10.83	1.05	13.23	0.82	14.58	0.73	16.33	0.66
	10	40	11.66	1.12	14.06	0.89	15.41	0.81	17.16	0.75
	15	35	12.49	1.26	14.89	1.03	16.24	0.95	17.99	0.87
	20	30	13.32	1.35	15.72	1.32	17.07	1.25	18.82	1.16
55	0	45	8.80	1.75	12.65	1.50	13.58	1.43	15.84	1.38
	5	40	11.83	1.30	14.47	1.08	15.96	0.99	17.88	0.90
	10	35	12.66	1.34	15.30	1.12	16.79	1.03	18.71	0.96
	15	30	13.49	1.35	16.13	1.13	17.62	1.06	19.54	0.99
	20	25	14.42	1.37	16.96	1.15	18.45	1.07	20.37	1.01
60	0	40	9.60	1.89	13.80	1.48	14.82	1.41	17.28	1.36
	5	35	12.83	1.41	15.71	1.18	17.33	1.08	19.43	0.99
	10	30	13.66	1.45	16.54	1.21	18.16	1.12	20.26	1.04
	15	25	14.49	1.46	17.37	1.24	18.99	1.16	21.09	1.07
	20	20	15.42	1.48	18.20	1.27	19.82	1.19	21.92	1.12

Т а б л и ц я 3

Нижча теплота згорання (Q , МДж/кг) та в'язкість (η , Па·с) суспензій з вмістом продуктів піролізу високомолекулярних полімерів на основі вугілля різного ступеня метаморфізму

C_T	$C_{гг}$	C_{H_2O}	Б		Г		Т		А	
%			Q	η	Q	η	Q	η	Q	η
45	0	55	7.2	1.42	10.35	1.39	11.12	1.37	12.96	1.21
	10	45	10.3	1.47	13.45	1.34	14.21	1.34	16.55	1.32
	20	35	13.4	1.42	16.55	1.27	17.31	1.36	19.65	1.27
	30	25	16.5	1.38	19.65	1.36	20.41	1.31	22.75	1.31
	40	15	19.6	1.41	22.75	1.38	23.51	1.38	25.85	1.33
50	0	50	8.0	1.37	11.50	1.32	12.35	1.26	14.40	1.18
	10	40	11.1	1.45	14.60	1.36	15.45	1.38	18.05	1.35
	20	30	14.2	1.39	17.70	1.31	18.55	1.27	21.15	1.30
	30	20	17.3	1.44	20.80	1.35	21.65	1.36	24.25	1.29
	40	10	20.4	1.49	23.90	1.38	24.75	1.39	27.35	1.32

суспензії мають набагато вищу калорійність, ніж аналогічні водовугільні, та характеризуються низьким викидом шкідливих газів при спалюванні.

ВИСНОВКИ. Визначено залежність гранулометричного складу суспензій вугілля залежно від концентрації гліцеролу в них. Показано, що збільшення кількості крупних частинок у дисперсійній системі відбувається зі зростанням кількості гліцеролу в них, причому така тенденція має більш виражений характер після досягнення концентрації гліцеролу в суспензії понад 30 % мас. Отримано суспензії на основі вугілля різного ступеня метаморфізму з використанням як дисперсійного середовища гліцеролу, продуктів піролізу високомолекулярних полімерів та води у різних співвідношеннях з максимальним вмістом вугілля 60 % мас. і допустимою в'язкістю (до 1.5 Па·с) з високою калорійністю та седиментаційною стійкістю (не менше 8 діб). Таким чином, використання суспензійного палива з даним дисперсійним середовищем дозволяє отримувати висококалорійне паливо та утилізувати рідкі органічні відходи (продукти піролізу високомолекулярних полімерів).

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО УГЛЯ

А.С.Макаров, Д.Ю.Садовский*, К.В.Макарова, О.И.Егурнов

Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В.Думанского НАН Украины, бульвар Академика Вернадского, 42, Киев, 03142, Украина
* e-mail: arkraa@gmail.com

В результате изучения реологических свойств суспензий угля в водно-глицероловой дисперсионной среде установлено, что с повышением стадии метаморфизма угля, то есть при переходе от бурого угля к антрациту, суспензии характеризуются меньшими значениями эффективной вязкости при одинаковом массовом содержании дисперсной фазы. Определена зависимость гранулометрического состава суспензий угля от концентрации глицерола. Получены суспензии на ос-

новое углей разной степени метаморфизма с использованием как дисперсионной среды глицерола, продуктов пиролиза высокомолекулярных полимеров и воды в различных соотношениях с максимальным содержанием угля 60 % мас. и допустимой вязкостью (до 1.5 Па·с) с высокой калорийностью и седиментационной стойкостью (не менее 8 сут).

К л ю ч е в ы е с л о в а: органоугольная суспензия, реологические характеристики, глицерол, продукты пиролиза, утилизация отходов.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF COAL-ORGANIC-WATER DISPERSED SYSTEMS BASED ON NATURAL COAL

A.S.Makarov, D.Yu.Sadovskyi*, K.V.Makarova, O.I.Yegurnov

A.V.Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 42 Academic Vernadsky boulevard, Kyiv, 03142, Ukraine
* e-mail: arkraa@gmail.com

As a result of studying the rheological properties of coal suspensions with a water-glycerol dispersion media, it was established that with an increase of the stage of coal metamorphism, that is, from the transition from lignite coal to anthracite, the suspensions are characterized by lower values of effective viscosity with the same mass content of the dispersed phase.

Dependence of granulometric composition of coal suspensions depending on concentration of glycerol in them was determined. Coal suspensions of varying degrees of metamorphism have been obtained using as a dispersion media glycerol, pyrolysis products of high molecular weight polymers and water in various ratios with a maximum content of coal of 60 % by weight and permissible viscosity (up to 1.5 Pa·s). It is important that water-glycerol suspensions of coal do not decompose within a week when stored in static conditions, even in the absence of stabilizing reagents. In this case, water-cooled suspensions under the same conditions are stable for no more than 24 hours. The structure of the sedimentation of coal suspensions also depends on the nature of the dispersion media. If in systems with glycerol content it is rather loose, then in the case of coal-water suspensions – a dense. In the case of hermetic storage, the viscosity of water-glycerol suspensions after stratification is easy to restore by simple mixing. Also, the advantage of preparing of coal disperse

systems with the content of glycerol is much higher values of it caloric content, compared with coal-water. It was shown that these fuel disperse systems have high stability and caloric content, which at high solids content and pyrolysis products is close to or exceeds the output coal. The resulting suspensions have a much higher caloric content than similar coal-water, and are characterized by low emissions of harmful gases during combustion.

К e y w o r d s: glycerol, rheological characteristics, coal-organic suspension, pyrolysis products, recycling.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. -Киев: Наук. думка, 2004.
2. Гринько Н.К. Использование чистых угольных технологий в России // Уголь. -2006. -№ 1. С. 6–8.
3. Franco A, Diaz A.R. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control // Energy. -2009. -**34**. -P. 348–354.
4. Макаров А.С., Савицкий Д.П., Егурнов А.И. Водугольное топливо на основе углей различной стадии метаморфизма // Современная наука. -2011. -**6**, № 1. -С. 16–20.
5. Мурко В.И., Федяев В.И., Хамяляйнен В.А. Физико-технические основы водугольного топлива. -Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009.
6. Ходаков Т.С., Горлов Е.Г., Головин Г.С. Суспензионное угольное топливо // Химия тв. топлива. -2005. -№ 6. -С. 15–32.
7. Ребиндер П.А. Избр. тр. -М.: Наука, 1978.
8. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. -М.: Колосс, 2003.
9. Barnes H.A. Thixotropy a review // J. Non-Newtonian Fluid Mechanics. -1997. -**70**. -P. 1–33.
10. Макаров А.С., Кобитович О.М., Савицкий Д.П., Егурнов О.И. Колоїдно-хімічні методи отримання палива на основі відходів вуглезбагачення // Вісн. НАН України. -2009. -№ 1. -С. 56–67.
11. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. Теоретические основы химии угля. -М.: Изд-во Москов. гос. горного ун-та, 2003.
12. Щукин Е.Д., Конторович С.И., Бессонов А.И. и др. Влияние жидкой среды на прочность и диспергируемость угля // Коллоид. журн. -1987. -**49**, № 4. -С. 728–737.
13. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фа-

зового течения и ее экспериментальное обоснование // Рос. хим. журн. -2003. -**47**, № 2. -С. 33–44.

14. Садовский Д.Ю., Макаров А.С., Савицкий Д.П., Масляк Р.Р. Получение композиционного водугольного топлива с использованием глицерина // Вопросы химии и хим. технологии. -2017. -№ 1. -С. 59–63.
15. Liu S., Musuku S.R., Adhikari S., Fernando S. The effect of water-glycerol mixtures on rheological properties of coal slurries // Environ. Technol. -2009. -**30**. -P. 505.
16. Wang S., Zhang Y., Abidi N., Cabrales L. Wettability and surface free energy of grapheme films // Langmuir. -2009. -**25**. -P. 11078.
17. Botsaris D.G., Glazman Yu.M. Interfacial phenomena in coal technology. -New York: Marcel Dekker, 1989. -P. 161–172.
18. Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. -М.: Машиностроение, 1968.

REFERENCES

1. Korchevoj Ju.P., Majstrenko A.Ju., Topal A.I. Clean coal energy technology. (Kiev: Naukova dumka, 2004).
2. Grin'ko N.K. Use of clean coal technologies in Russia. *Ugol'*. 2006. (1): 6.
3. Franco A., Diaz A.R. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy*. 2009. **34**: 348.
4. Makarov A.S., Savickij D.P., Egurnov A.I. Coal-water fuel based on coal of various stages of metamorphism. *Sovremennaja nauka*. 2011. **6** (1): 16.
5. Murko V.I., Fedjaev V.I., Hamjalajnen V.A. Physical and technical basis of coal-water fuel. (Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2009).
6. Hodakov T.S., Gorlov E.G., Golovin G.S. Coal slurry fuel. *Himija tverdogo topliva*. 2005. (6): 15.
7. Rebinder P.A. *Selected Works*. (Moscow: Nauka, 1978).
8. Shramm G. *Basics of practical rheology and rheometry*. (Moscow: Koloss, 2003).
9. Barnes H.A. Thixotropy a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1997. **70**: 1.
10. Makarov A.S., Kobitovy'ch O.M., Savicz'ky'j D.P., Yegurnov O.I. Colloid-chemical methods of producing fuels from waste coal. *Visn. NAN Ukrayiny*. 2009. (1): 56.
11. Gjul'maliev A.M., Golovin G.S., Gladun T.G.

- Theoretical foundations of coal chemistry. (Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2003).
12. Shhukin E.D., Kontorovich S.I., Bessonov A.I. The influence of a liquid media on the strength and dispersibility of coal. *Kolloidnyj zhurnal*. 1987. **49** (4): 728.
 13. Hodakov G.S. Rheology of suspensions. Theory of phase flow and its experimental justification. *Ros. him. zhurn.* 2003. **47** (2): 33.
 14. Sadovskij D.Ju., Makarov A.S., Savickij D.P., Masljak R.R. Production of composite coal-water fuel using glycerin. *Voprosy himii i himicheskoy tehnologii*. 2017. (1): 59.
 15. Liu S., Musuku S.R., Adhikari S., Fernando S. The effect of water-glycerol mixtures on rheological properties of coal slurries. *Environ. Techol.* 2009. **30**: 505.
 16. Wang S., Zhang Y., Abidi N., Cabrales L. Wettability and surface free energy of grapheme films. *Langmuir*. 2009. **25**: 11078.
 17. Botsaris D.G., Glazman Yu.M. Interfacial phenomena in coal technology. (New York: Marcel Dekker, 1989).
 18. Belkin I.M., Vinogradov G.V., Leonov A.I. Rotary instruments. Measurement of viscosity and physico-mechanical characteristics of materials. (Moskva: Mashinostroenie, 1968).

Надійшла 21.01.2019