

УДК 67.02/67.08

к.т.н. Капустин Д. А.
(ЛГПУ, г. Луганск, ЛНР, kap-kapchik@mail.ru),

к.т.н. Кущенко А. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, akm48848@gmail.com)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ

Работа посвящена исследованию неньютоновских характеристик высококонцентрированных водоугольных топлив из каменных углей Донбасса. Установлено, что зависимость напряжения от скорости сдвига при высоких концентрациях твердого компонента носит нелинейный характер, что ярко выражено на начальном участке графика. Впервые получено, что в зависимости от типа угля аномальное поведение начинается при различных концентрациях твердой фазы, а также изучено влияние концентрации твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ и гранулометрического распределения на поведение водоугольных сред.

Ключевые слова: уголь, напряжение сдвига, скорость сдвига, концентрация, зольность, гранулометрический состав, измерение.

Одним из главных направлений использования угля является приготовление водоугольной суспензии как из каменных углей Донбасского региона (ДР), так и из отходов их обогащения.

Известно, что ряд ведущих стран мира активно внедряет и использует технологии водоугольного топлива (ВУТ) и водоугольных суспензий (ВУС) [3, 5, 8, 9].

Следует отметить, что основными характеристиками высококонцентрированных водоугольных сред являются вязкость и напряжение сдвига. Исследователи различают несколько типов напряжения сдвига в зависимости от его природы: начальное, предельное напряжение сдвига и т. д.

Среди спектра параметров, влияющих на реологические показатели ВУТ, стоит выделить концентрацию твердого компонента C , скорость сдвига $\dot{\gamma}$, зольность исходного материала A^d , фракционный состав (критерий бимодальности Γ), а также выход летучих веществ V^f [2–5].

Кроме того, при движении ВУС по трубам определяют потери напора и рекомендуемую скорость течения для их минимизации, а также сохранения работоспособности системы в целом. Установ-

лено, что величина необходимой скорости течения различна и тесно связана с диаметром трубопровода, при этом значение средней скорости сдвига находится около 20 c^{-1} [2, 5].

Еще одной важной характеристикой ВУТ является седиментационная стабильность [3, 4, 6]. Этот показатель позволяет оценить период сохранения водоугольным топливом реологических свойств в состоянии покоя. Установлено, что изготовление стабильного ВУТ крайне затруднительно и требует совершенства технологии его изготовления, а также неизменности качества исходного сырья. В остальных случаях необходима периодическая гомогенизация водоугольной среды. В случае если не планируется длительное хранение ВУС и при условии ее перемешивания в емкостях для хранения, отпадает необходимость в проведении седиментационных исследований.

Целью настоящей работы является определение реологических характеристик течения высококонцентрированных водоугольных суспензий на основе различных типов каменных углей ДР, а именно напряжения от скорости сдвига.

Объект исследования — реологические параметры ВУС.

Предмет исследования — закономерности изменения реологических свойств ВУС в зависимости от скорости сдвига.

Задачи исследования:

– определение доминантных факторов влияния на основе доступных источников информации и результатов данных испытаний;

– определение фракционного состава и других необходимых свойств исходных углей;

– определение реологических свойств высококонцентрированных водоугольных суспензий;

– анализ полученных результатов.

Изучением процессов транспортировки твердых материалов занимались в основном ВНИИГ им. Веденеева и ВНИИУглеобогатения. Было проведено большое количество исследований перемещения ВУС до массовой концентрации 60–70 %. Однако однозначных данных о реологических свойствах концентрированных водоугольных сред представлено не было [2, 4, 5, 7].

Опираясь на постулаты специалистов коллоидной химии, можно предположить, что твердый компонент, в состав которого входят частицы размером до 10 мкм в количестве от 3–5 %, образует в смеси с водой пространственную структуру, основанную на силах ван-дер-ваальсового взаимодействия [3, 6].

Авторами проведены исследования по изучению реологических свойств концентрированной ВУС при массовом содержании твердого компонента от 62 до 67 % на базе лаборатории Луганского государственного университета им. В. Даля.

Для исследований использованы угли марок Г и ОС, а также антрациты (А), свойства которых представлены в таблице 1.

Авторами проведен ситовой анализ исследуемого материала, включающий отбор проб для определения гранулометрического состава углей различной степени измельчения. Степень измельчения определяется величиной срединного диаметра частиц. Однако при одинаковой величине данного параметра наблюдается различное реологическое поведение получаемых суспензий, что обусловлено различным содержанием крупной (одномодальное распределение) и мелкой (одномодальное распределение) фракций в расसेве. Отношение их масс является критерием бимодальности: чем больше содержание мелкой фракции, тем выше значение критерия G .

В исследовании использованы сита с ячейками 800, 400, 280, 200, 100, 71 и 40 мкм, устанавливаемые в вибрационный ситовой анализатор; время рассева составляло 20 мин.

Рассев осуществлялся промывкой исследуемого материала водой до получения осветленной воды на выходе. После чего сита просушивались. Содержание класса определялось взвешиванием остатка на сите на аналитических весах с точностью до 0,1 грамма.

В таблице 2 представлены полученные данные о гранулометрическом распределении фракций в исследуемых 8-ми пробах. Данные пробы получены в результате помола в шаровой мельнице с разной продолжительностью.

Таблица 1

Свойства исследуемых углей

Показатели	Марка угля		
	Г	ОС	А
Зольность A^d , %	13,6–35	10,0–35,2	10,0–35,1
Влажность W^d , %	8,0	9,0	5,1
Сера S_t^d , %	3,2	2,5	0,8
Выход летучих веществ V^d , %	45	25	5
Низшая теплота сгорания Q_H , ккал/кг	5868	6000	7188
Плотность, кг/м ³	1250	1325	1400

Таблица 2

Гранулометрическое распределение исследуемых углей

№ п/п	Класс, мкм	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4	Проба 5	Проба 6	Проба 7	Проба 8
		Выход классов, %							
1	500+	-	-	0,7	0,4	-	-	-	-
2	300–500	1,1	-	0,8	3,1	-	-	-	-
3	250–300	3,3	3,1	0,6	2,9	0,5	0,1	-	-
4	200–250	9,2	8,3	2,8	1,8	2,7	2,8	2,4	-
5	100–200	21,9	13,3	9,9	9	8,5	8	7,3	10,3
6	80–100	6,1	22,9	23	20,2	19,5	18,5	16	13,3
7	40–80	31,9	7,2	7,1	10,3	6,8	6,5	5,6	5,6
8	0–40	26,5	45,2	55,1	52,3	62	64,1	68,7	70,8
Значение критерия бимодальности Γ		0,71	1,02	1,54	1,69	2,02	2,19	2,67	3,01

Проведение данных испытаний обусловлено необходимостью определения существенных факторов влияния на поведение высококонцентрированного ВУТ при его внутритрубном течении для проведения в дальнейшем планированного эксперимента.

В связи со сложным поведением реологической кривой ВУС в области определения скорости сдвига от 0 до $48,6 \text{ с}^{-1}$ [3, 5] (что характерно для его внутритрубного течения) при условии выбора трех опорных точек (пробы 2, 5, 8) по значению критерия бимодальности возникла необходимость в определении параметров при промежуточных значениях критерия Γ (пробы 1, 3, 4, 6, 7).

С учетом предыдущих исследований в области течения высококонцентрированных ВУТ [6, 7, 9, 10] готовились пробы для реологического анализа с массовой концентрацией твердого материала 62, 64,5, 67 %. При этом низшая концентрация выбрана из соображений обеспечения минимально допустимой энергоемкости. Значения зольности A^d и выхода летучих веществ V^F принимали значения от 10 до 35,2 % и от 5 до 45 % соответственно для различных типов углей.

Как измерительный прибор использовался ротационный вискозиметр «Полимер РПЭ-1М» с системой цилиндрических воспринимающих элементов [1].

В стакан вискозиметра заливался объем суспензии, нормированный инструкцией, после чего стакан вставлялся в вискозиметр, и снимались результаты. Скорость смещения изменялась от 1 до $48,6 \text{ с}^{-1}$, при этом для каждой скорости сдвига проводилась серия из пяти измерений, результаты которых при обработке усреднялись.

Ввиду сложности и разнохарактерности определяемых зависимостей для проведения эксперимента был выбран полнофакторный пятифакторный трехуровневый план. Пробные эксперименты показали недостаточность неполнофакторных планов для получения на их основе корректных функций отклика.

С целью обеспечения удобства доступа читателей к результатам исследований и полноты восприятия по каждому из типов углей и комплексу свойств всех испытанных вариантов водоугольных составов ниже по тексту приведены в графическом виде результаты реализации полнофакторного плана эксперимента.

На рисунках 1-3 представлены кривые зависимости напряжения от скорости сдвига при различных значениях концентрации твердой фазы C , зольности исходного угля A^d , выхода летучих веществ V^F и критерия бимодальности Γ .

Из анализа приведенных графиков следует, что подтверждена существенная нелиней-

ность кривой напряжения сдвига в области значений скорости сдвига от 0 до 9–16 с⁻¹.

Следует отметить, что существенно нелинейным оказывается поведение исследуемой суспензии в зависимости от критерия бимодальности Γ (рис. 4), что оправдывает выбор 8-ми точек (3-х опорных и 5-ти дополнительных) для исследования ее реологических параметров.

В ходе анализа представленных на рисунке 4 кривых установлено, что зависимость напряжения сдвига от величины критерия бимодальности Γ имеет сложный характер с минимумом значения функции в диапазоне от 1,5 до 1,8. Такое поведение обусловлено приближением гранулометрического состава к оптимальному значению и связанным с этим снижением вязкости суспензии.

Анализ зависимостей напряжения сдвига от выхода летучих веществ V^T (рис. 5) позволил установить, что увеличение функции происходит по логарифмическому закону. Аппроксимационное уравнение имеет вид

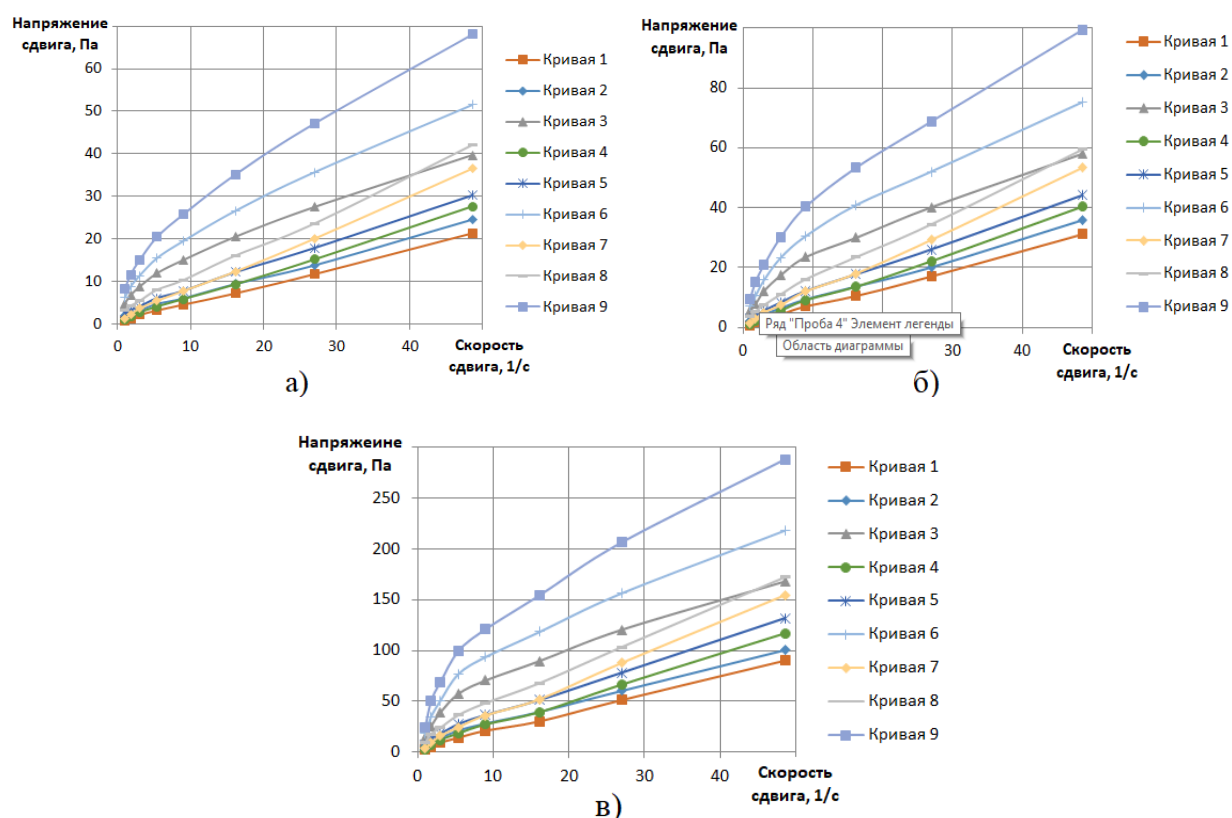
$$\tau = a \ln(V^T) + b,$$

где a, b — коэффициенты аппроксимации.

Установлено, что с увеличением зольности исходного угля происходит возрастание напряжения сдвига по экспоненциальному закону (рис. 6), при этом зависимость может быть аппроксимирована уравнением

$$\tau = a \cdot e^{b \cdot A^d},$$

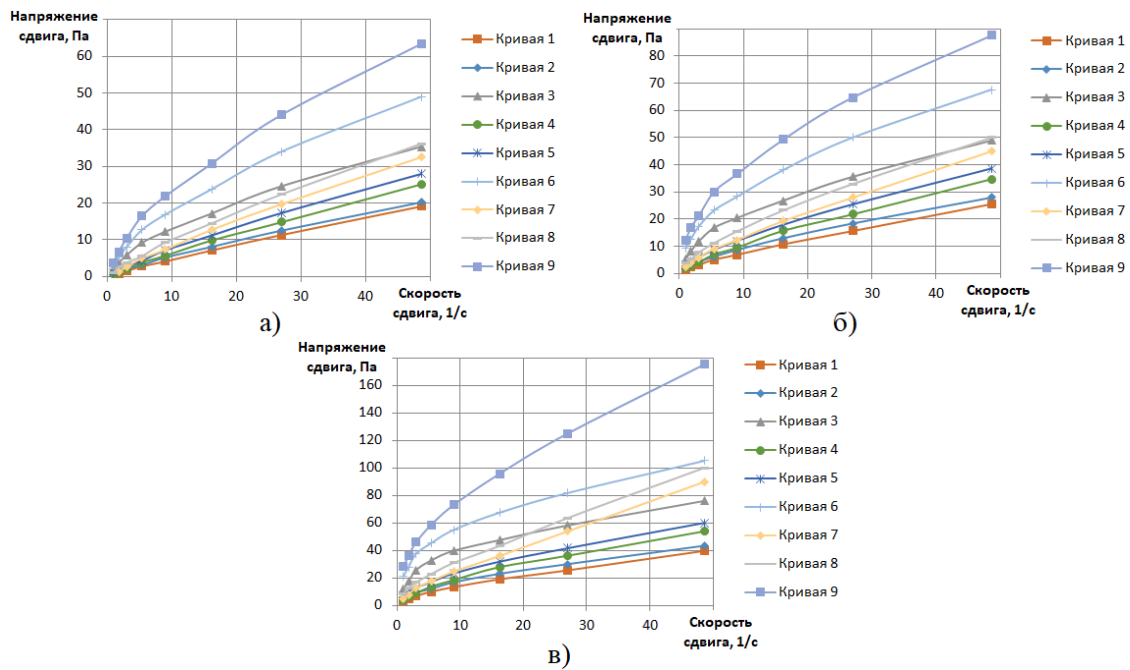
где a, b — коэффициенты аппроксимации, зависящие от типа угля.



а, б, в — концентрация твердой фазы $C = 62, 64,5, 67$ % соответственно;
критерий бимодальности $\Gamma = 1,02; 2,02; 3,01$ — кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно;
зольность угля $A^d = 13,6; 25,2; 35$ % — кривые 1–3; 4–6; 7–9 соответственно

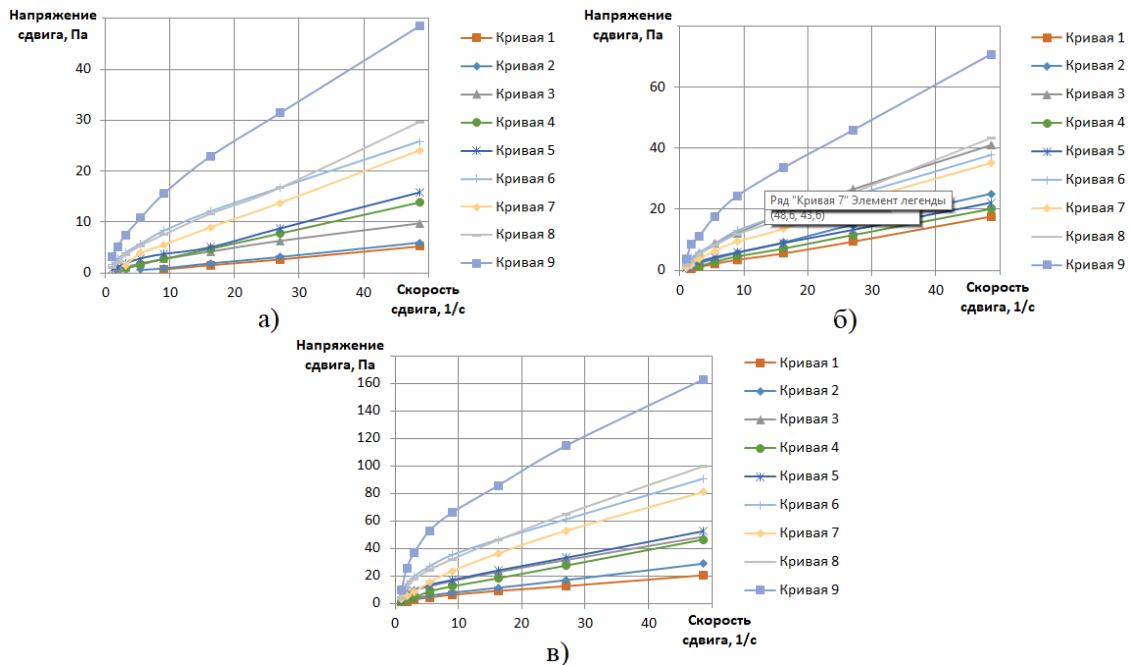
Рисунок 1 Зависимость напряжения от скорости сдвига для угля марки Γ (выход летучих веществ $V^T = 45$ %)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ



а, б, в — концентрация твердой фазы $C = 62, 64,5, 67\%$ соответственно;
 критерий бимодальности $\Gamma = 1,02; 2,02; 3,01$ — кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно;
 зольность угля $A^d = 10; 25,1; 35,2\%$ — кривые 1–3; 4–6; 7–9 соответственно

Рисунок 2 Зависимость напряжения от скорости сдвига для угля марки ОС
 (выход летучих веществ $V^T = 25\%$)



а, б, в — концентрация твердой фазы $C = 62; 64,5; 67\%$ соответственно;
 критерий бимодальности $\Gamma = 1,02; 2,02; 3,01$ — кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно;
 зольность угля $A^d = 10; 25; 35,1\%$ — кривые 1–3; 4–6; 7–9 соответственно

Рисунок 3 Зависимость величины напряжения от скорости сдвига для угля марки А
 (выход летучих веществ $V^T = 5\%$)

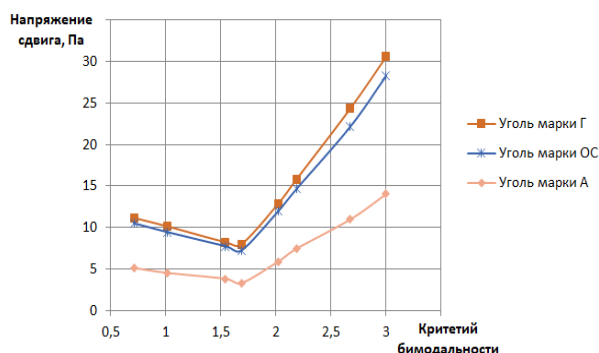


Рисунок 4 Зависимость напряжения сдвига от величины критерия бимодальности Γ при концентрации твердой фазы $C = 64,5\%$ и зольности исходного угля $A^d = 25\%$

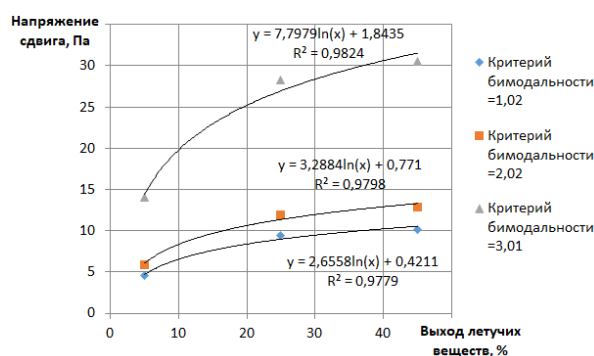


Рисунок 5 Зависимость напряжения сдвига от выхода летучих веществ V^F при концентрации твердой фазы $C = 64,5\%$ и зольности исходного угля $A^d = 25\%$

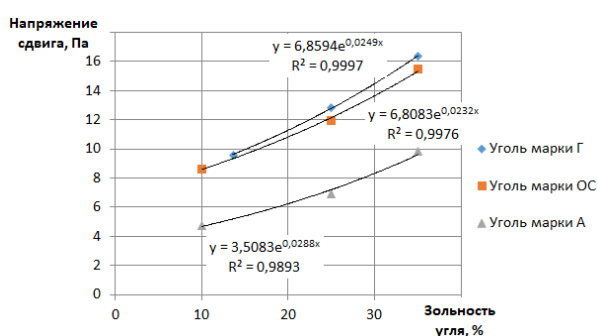


Рисунок 6 Зависимость напряжения сдвига от зольности исходного угля A^d при концентрации твердой фазы $C = 64,5\%$ и соответствующем значении критерия бимодальности $\Gamma = 2,02$

Кроме этого установлено, что каждый из исследованных факторов влияния явля-

ется существенным, поскольку его влияние в исследованной области определения скорости сдвига превышает 10 %.

В результате проведенных исследований установлены зависимости свойств высококонцентрированной водоугольной суспензии от концентрации твердого компонента, зольности угля, фракционного состава угля (критерий бимодальности), выхода летучих веществ, а также скорости сдвига. Следует отметить, что проведенные эксперименты во многом подтверждают и дополняют теоретические аспекты поведения ВУС (ВУТ), а также коррелируют с экспериментальными данными других авторов.

Выполненные исследования позволили сделать нижеприведенные выводы:

1. В результате проведенных исследований установлено, что на величину напряжения сдвига в значительной степени (до 20 и более раз) влияют следующие факторы: концентрация твердого компонента, зольность угля, фракционный состав (критерий бимодальности), выход летучих веществ, а также скорость сдвига.

2. Установлено, что подавляющее большинство представленных зависимостей касательного напряжения целесообразно разделить на два участка — криволинейный и прямолинейный, граничным значением для которых является скорость сдвига $9-16 \text{ c}^{-1}$.

3. Впервые установлено, что зависимость напряжения сдвига от фракционного состава носит сложный характер, локальный минимум наблюдается при значениях критерия бимодальности 1,5–1,8; при увеличении значения критерия Γ от 0,71 до 1,69 наблюдается снижение напряжения сдвига на 55–65 %, затем, при увеличении критерия до 3, происходит резкое возрастание величины касательного напряжения в 3,5–4 раза.

4. Впервые определена зависимость напряжения сдвига от величины выхода летучих веществ, она носит логарифмический характер и возрастает с ростом V^F .

5. С ростом зольности исходного угля A^d происходит возрастание напряжения сдвига, а закономерность подчиняется экспоненциальной зависимости.

Поскольку реологические свойства определяют гидравлические характеристики поведения ВУС, то полученные зависимости имеют большое значение для совершенствования расчета внутритрубного те-

чения водоугольных топлив и подбора насосного оборудования.

Дальнейшие исследования будут направлены на обработку данных и их регрессионный анализ.

Библиографический список

1. Вискозиметр «Полимер РПЭ-1М». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 1988. — 36 с.
2. Баранов, И. О. Повышение эффективности транспортировки высококонцентрированного водоугольного топлива в гидротранспортных системах промышленных предприятий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Баранов Игорь Олегович. — Днепрпетровск, 2019. — 217 с.
3. Баранова, М. П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Баранова Марина Петровна. — Москва, 2014. — 275 с.
4. Бойко, Е. Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Бойко Екатерина Евгеньевна. — Новосибирск, 2018. — 162 с.
5. Круть, А. А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Круть Александр Анатольевич. — Днепрпетровск, 2011. — 279 с.
6. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий [Текст] : монография / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 308 с.
7. Свитлый, Ю. Г. Гидравлический транспорт твердых материалов [Текст] / Ю. Г. Свитлый, А. А. Круть. — Донецк : Восточный издательский дом, 2010. — 268 с.
8. Pan, F. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units [Text] / F. Pan, Y. Zhu, X. Zhang // International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). — 2011. — P. 3750–3753.
9. Perkins, R. P. Coal slurry development program [Text] / R. P. Perkins, R. K. Manfred // Chem. Eng. progr. — 1995. — N. 5. — P. 69–76.
10. Pulido, J. E. Rheology of colombian coal-water slurry fuels: Effect of particle-size distribution [Text] / J. E. Pulido, C. P. Rojas, G. Acero // Coal Science. — Amsterdam, 2005. — P. 1585–1588.

© Капустин Д. А.

© Кущенко А. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г., д.т.н., проф. каф. ПБ ЛГУ им. В. Даля Ермак В. П.

Статья поступила в редакцию 27.07.2021.

PhD in Engineering Kapustin D. A. (LSPU, Lugansk, LPR, kap-kapchik@mail.ru), **PhD in Engineering Kushchenko A. V.** (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, akm48848@gmail.com)
RESEARCH OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COAL-WATER SUSPENSIONS BASED ON HARD COALS

The paper is devoted to the study of non-Newtonian characteristics of highly concentrated water-coal fuels from Donbass hard coals. It is determined that the dependence of voltage on shear rate at high concentrations of solid component is nonlinear, which is clearly expressed in the initial section of graph. For the first time, it was found that depending on coal type, the abnormal behavior begins at different concentrations of solid phase, and the influence of concentration of solid phase, ash content of the initial coal, yield of volatile substances and granulometric distribution on the behavior of coal-water media was studied.

Key words: coal, shear stress, shear rate, concentration, ash content, granulometric composition, measurement.