

УДК 621.311.22:622.7.002.68:662.654

Г.Д. Вахрушева, В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенок,
В.П. Мастихина, Д.А. Дзюба

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

В представленной ниже статье приведены результаты определений реологических и теплофизических характеристик супензионного угольного топлива (ВУТ) на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения (фильтр-kekов) Кузбасса.

Материалы статьи подготовлены в процессе реализации проекта в рамках частно-государственного партнерства в сфере реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (шифр 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание pilotного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения»).

Введение

Полученные результаты могут быть использованы для расчета технологических схем комплексов для приготовления и сжигания углеотходов в виде ВУТ.

Высокие требования потребителей к качеству угля способствуют развитию углеобогащения. За последние годы только в Кузбассе введено в строй более 10 углеобогатительных фабрик.

Отличительными особенностями новых фабрик являются применение замкнутого водношламового цикла и отсутствие отделений термической сушки. Вместе с тем при обогащении образуется от 0,5 до 7% от переработанного угля тонкодисперсных отходов с влажностью от 20 до 45% и зольностью от 18% до 60%.

В настоящее время данный продукт не реализуется и сбрасывается в отвалы. Количество таких отходов только в Кузбассе составляет свыше 150 млн. т и продолжает непрерывно возрастать более чем на 150 т в сутки. В результате безвозвратно теряются миллионы тонн добываемого угля, а также усугубляется и без того неблагоприятная экологическая обстановка в регионе.

Экологический ущерб обусловлен тем, что при таянии снега и в период выпадения осадков, адсорбированные на поверхности твердых частиц углеотходов коагулянты, флокулянты и другие химические реагенты в растворенном виде и вместе с угольными частицами попадают в близлежащие водоемы и почву.

На рис. 1 представлена типовая схема получения фильтр-kekов на фильтр-прессах на углеобогатительных фабриках [1].

В табл. 1 приведены сводные данные по каче-

ственным показателям фильтр-kekов, получаемым на углеобогатительных фабриках, типам и количеству установленных фильтр-прессов.

Учитывая, что в литературе в настоящее время практически отсутствуют сведения о реологических параметрах и теплофизических характеристиках водоугольных супензий, получаемых из тонкодисперсных отходов углеобогащения, данные исследования являются актуальными для правильного выбора технологического оборудования и проведения расчетов и проектирования установок приготовления и сжигания ВУТ.

Экспериментальная часть

Анализ табл. 1 показывает, что с учетом крупности тонкодисперсных отходов углеобогащения, как правило, не превышающей 500 мкм, и влажности, равной 30÷45%, наиболее эффективным направлением утилизации отходов углеобогащения является их сжигание в виде водоугольных супензий (ВУТ). В этом случае обеспечивается использование всего добываемого угля по его прямому назначению, а образующаяся при сжигании зола является хорошим строительным материалом. В результате появляется возможность существенно сократить объемы площадей, занятых гидроотвалами и отстойниками, и рекультивировать нарушенные земли.

Таким образом, утилизация тонкодисперсных отходов углеобогащения является актуальной задачей решения экономических и экологических проблем угледобывающих регионов.

Свойства фильтр-kekов (табл. 1) учитываются при разработке технологии приготовления ВУТ на основе фильтр-kekов ОФ.

Элементы технологии приготовления ВУТ были исследованы в лабораторных условиях.

Для проведения исследований по определению возможности приготовления супензионного угольного топлива из фильтр-kekов отобраны и проанализированы пробы фильтр-kekов, полученных от переработки углей различных стадий метаморфизма (марки угля) и зольностей Кузнецкого угольного бассейна:

При этом решались следующие задачи:

- разработка составов комплексных пластифицирующих добавок при приготовлении водоугольного топлива из фильтр-kekов в лабораторных условиях;

- определение значений основных структурно-реологических характеристик полученного ВУТ и

выбор оптимального варианта добавки;

- определение и анализ теплофизических характеристик ВУТ.

Характеристика проб исходного сырья представлена в табл. 2.

Для исследования приготовления ВУТ и выбора пластифицирующих добавок использовалась смесительная камера вибростенда СВУ-2 (вибросмеситель), в котором проводилось перемешивание исходных компонентов супензионного угольного топлива.

Согласно методике в вибросмеситель загружался исходный материал, комплексная добавка и при необходимости водопроводная вода.

Для определения оптимальной добавки при приготовлении ВУТ из фильтр-kekов использовалось несколько видов комплексных добавок. Добавки состояли как из одного компонента, так и из двух компонентов: разжижающего и стабилизирующего.

Количество добавки от твердой фазы менялось в зависимости от вида добавки и полученного результата эксперимента.

Для проведения исследований по определению возможности приготовления супензионного угольного топлива из фильтр-kekов отобраны и проанализированы пробы фильтр-kekов, полученных от переработки углей различных стадий метаморфизма (марки угля) и зольностей Кузнецкого угольного бассейна:

При этом решались следующие задачи:

- разработка составов комплексных пластифицирующих добавок при приготовлении водоугольного топлива из фильтр-kekов в лабораторных условиях;

- определение значений основных структурно-реологических характеристик полученного ВУТ и выбор оптимального варианта добавки;

- определение и анализ теплофизических характеристик ВУТ.

Характеристика проб исходного сырья представлена в табл. 2.

Для исследования приготовления ВУТ и выбора пластифицирующих добавок использовалась смесительная камера вибростенда СВУ-2 (вибросмеситель), в котором проводилось перемешивание исходных компонентов супензионного угольного топлива из фильтр-kekов.

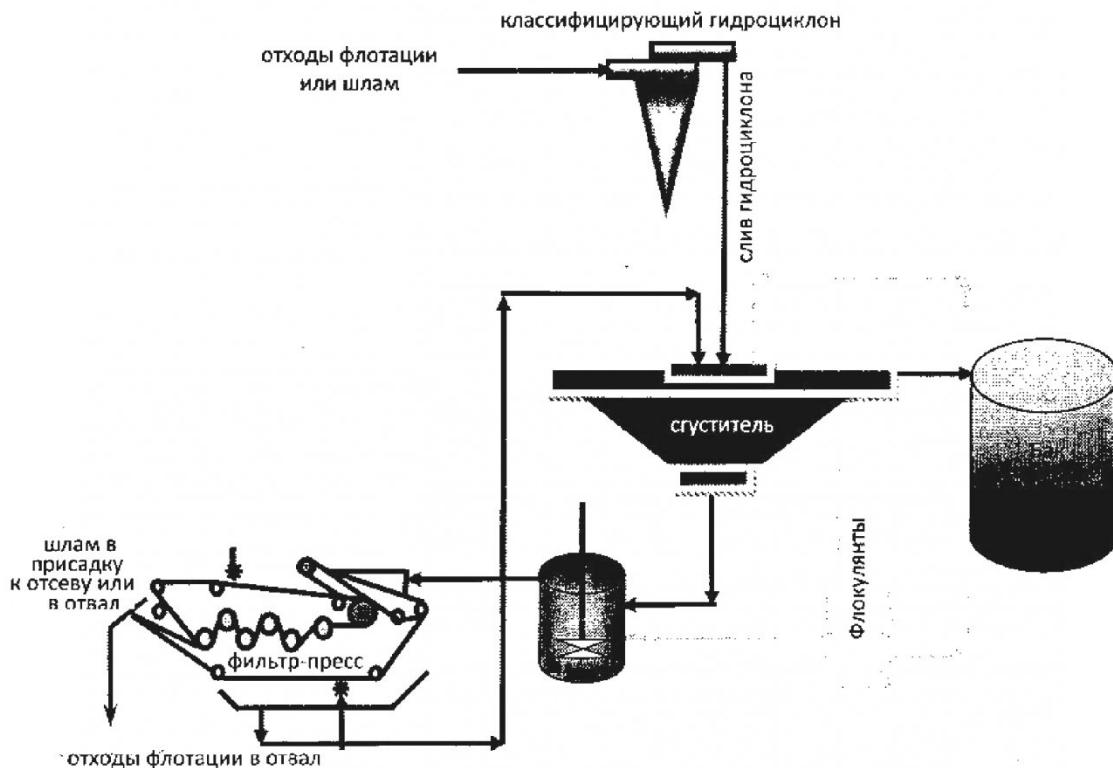


Рис. 1. Типовая схема установки фильтр-пресса

Также изменялось соотношение компонентов в составе комплексных добавок.

Свойства фильтр-kekов (таблица 1) учитываются при разработке технологии приготовления ВУТ на основе фильтр-kekов ОФ.

Элементы технологии приготовления ВУТ были исследованы в лабораторных условиях.

вание исходных компонентов супензионного угольного топлива.

Согласно методике в вибросмеситель загружался исходный материал, комплексная добавка и при необходимости водопроводная вода.

Для определения оптимальной добавки при приготовлении ВУТ из фильтр-kekов использовалось несколько видов комплексных добавок. До-

бавки состояли как из одного компонента, так и из двух компонентов: разжижающего и стабилизирующего.

Количество добавки от твердой фазы менялось в зависимости от вида добавки и полученного результата эксперимента. Также изменялось соотношение компонентов в составе комплексных добавок.

Оптимальный вариант добавки определялся из

условия минимальной вязкости при наибольшем содержании твердой фазы в ВУТ. Кроме того устанавливалась статическая стабильность, которая должна быть не менее 20 суток.

Характеристика отдельных проб суспензионного угольного топлива на основе фильтр-kekов с анализируемыми предприятиями приведена в табл.3, а реологические модели течения – в табл. 4 .

Таблица 1. Данные по использованию фильтр-прессов на обогатительных фабриках

Наименование предприятия	Качество фильтр-kekов			Характеристики фильтр-прессов			
	Зольность осадка, %	Влажность осадка, %	Класс, мм	Название	Кол-во	Производительность одного, т/ч	Общая производительность, т/ч
ЦОФ «Абашевская»	отходы флотации 13,0-65,0	до 50,0	0-0,2	«Андриц» CPF 2200 S7	2	10,0-12,0	20,0-24,0
ОФ «Антоновская»	шлам 14,0-16,0	34,0-36,0	0-0,1	WXG-3,0	2	12,0	24,0
ОУ «Барзасское товарищество»	шлам 19,8	до 35,0	0-0,3	«EIMCO MDP-1,5»	1	7,5	7,5
ОФ «Бачатская Коксовая»	отходы флотации 39,5-52,0	до 35,0	0-0,3	WXG-3,0	3	8,6	25,8
ОФ «Бачатская Энергетическая»	шлам 7,3	30,0-38,0	0-0,1	3М МК3 PRESS	1	6,2	6,2
ЦОФ «Беловская»	отходы флотации 55,0-70,0	до 50,0	0-0,5	«Вемко»-2,6	3	14,0	42,0
ЦОФ «Березовская»	отходы флотации 48,0-55,0	до 50,0	0-0,2	«Андриц АГ»-2,2	3	10,0-12,0	30,0-36,0
ОФ «Красногорский разрез»	шлам 24,0-28,0	35,0	0-0,1	BN-3M	2	18,0	36,0
ЦОФ Кузбасская»	шлам 28,0-30,0	40,0-45,0	0-0,2	«Андриц CPF 2200 S7	2	15,0	30,0
ЗАО ОФ «Междуреченская» 2 техкомплекс	отходы флотации 55,0-65,0	до 45,0	0-0,15	«EIMCO»-2,6	2	12,3	24,6
ОФ «Нерюнгринская»	конц. 8,4-8,6 микст 26,5-36,0	30,0 34,0-36,0	0-0,5	«EIMCO MDP-2,6»	12 6	8,0 7,2	- 42,0
ОФ «Северная»	отходы флотации 25,0-30,0	до 45,0	0-0,15	WXG-3,0	3	16,8	50,4
ОФ «Спутник»	шлам 25,0-27,0	до 40,0	0-0,15	WXG-3,0	2	21,0	42,0
ОУ «Шестаки»	шлам 21,7	до 30,0	0-0,15	«EIMCO MDP-1,5»	1	4,4	4,4
ОФ «Тугнуйская»	шлам 50,6-52,1	до 45,0	0-0,05	WXG-3,0 «Phoenix»	3	15,0	45,0
ИТОГО:							439,9 2639400
в час							
в год							

Таблица 2. Характеристика исходных продуктов

№ пробы	Наимено- вание продукта	Марка угля	Влага общая, W_t^r , %	Золь- ность, A^d , %	Гранулометрический состав, % Классы крупности, мм							Низкая теплота сгорания, Q_i^r , МДж/кг (ккал/кг)	
					+3,0	1,0-3,0	0,355- 1,0	0,250- 0,355	0,160- 0,250	0,071- 0,160	-0,071		
ОФ «Северная»													
1	фильтр-kek	КО+К	47,4	23,6	-	-	3,0	1,9	2,2	7,1	85,8	12,4 (2969)	
2	фильтр-kek	КО+К	46,7	24,0	-	-	3,8	2,1	2,3	8,3	83,5	12,6 (2999)	
3	фильтр-kek	КО+К	45,0	18,7	-	-	0,1	0,5	0,9	4,8	93,7	14,0 (3349)	
ЦОФ «Абашевская»													
1	фильтр-kek	ГЖ	31,5	28,2	1,5	1,4	8,5	6,4	6,9	14,8	60,5	14,5 (3463)	
2	фильтр-kek	ГЖ	34,0	24,6	1,9	2,4	27,0		23,7		45,0	14,6 (3492)	
ОФ «Щедрухинская»													
1	фильтр-kek	Г	41,3	26,2	-	0,1	0,8	2,0	13,2		83,9	13,4 (3211)	
2	фильтр-kek	Г	37,8	32,5	-	1,1	4,9	3,7	24,2		66,1	13,1 (3140)	
3	фильтр-kek	Г	39,9	32,9	-	1,7	5,7	3,2	23,5		65,9	12,5 (2980)	
4	фильтр-kek	Г	42,3	31,5	-	0,6	2,5	2,9	20,5		73,5	12,1 (2902)	
ОФ «Междуреченская»													
1	фильтр-kek	Т	34,1	44,6	-	1,4	3,1	2,7	28,2		64,6	11,5 (2758)	
2	фильтр-kek	КС	34,9	52,3	-	9,7	12,0	6,0	20,2		52,1	10,0 (2390)	
ЦОФ «Кузбасская»													
1	фильтр-kek	Ж+К	42,8	28,1	-	0,2	2,6	3,2	23,0		71,0	13,1 (3137)	
ОФ «Красногорская»													
1	фильтр-kek	Т	36,7	28,0	-	1,5	2,9	2,0	18,6		75,0	14,7 (3518)	
ОФ «Спутник»													
1	фильтр-kek	Г	32,0	29,1	-	-	0,7	2,0	5,6	21,1	70,6	14,5 (3458)	
2	фильтр-kek	Г	35,6	25,6	-	-	1,2	3,5	7,5	24,0	63,8	14,3 (3415)	
3	фильтр-kek	Г	37,1	30,4	-	-	0,8	1,7	5,0	22,1	70,4	12,9 (3093)	

Результаты и их обсуждение

Анализ табл. 2 показал, что зольность исследуемых проб фильтр-kekов изменялась в широком диапазоне: от 18,7% фильтр-kek ОФ «Северная» до 52,3% фильтр-kek марки «КС» ОФ «Междуреченская». Влажность фильтр-kekов анализируемых проб варьировалась в интервале значений от 31,5% (фильтр-kek ЦОФ «Абашевская») до 47,4% (фильтр-kek ОФ «Северная»).

Таким образом, наиболее влажные – пробы фильтр-kekа с ОФ «Северная», а наиболее зольные – с ОФ «Междуреченская». Пробы фильтр-kekов с ЦОФ «Абашевская», ОФ «Щедрухинская», ЦОФ «Кузбасская», ОФ «Красногорская» и ОФ «Спутник» имели срединные значения, как по влажности, так и по зольности.

Гранулометрический состав исследуемых проб фильтр-kekа также неоднороден по крупности. Наиболее тонкодисперсную структуру имели шламы ОФ «Северная», в отдельных пробах которых выход класса менее 0,071 мм достигал 93,7% (проба № 3).

Наиболее крупными по гранулометрическому составу являлись шламы (отходы) ЦОФ «Абашевская», в пробах которой присутствовал класс +3,0 мм в количестве 1,5%-1,9% от исходного, выход класса менее 0,071 мм в пробе № 2 – 45,0%.

Гранулометрический состав проб фильтр-

kekов с остальных анализируемых предприятий имел приблизительно одинаковое распределение выходов по классам крупности. Обработка гранулометрического состава твердых частиц в ВУТ из табл. 3 по уравнению Розина-Раммлера [2] показала, что полученные зависимости хорошо описывают экспериментальные значения (рис. 2).

Учитывая, что водоугольные суспензии с массовой долей твердой фазы более 50% являются неньютоновскими жидкостями, для каждой из исследуемых проб ВУТ по результатам измерений напряжений сдвига на различных скоростях сдвига определялись соответствующие коэффициенты реологических уравнений.

Для лучших по реологическим свойствам проб построены кривые течения.

На рис. 3 реологические кривые ВУТ для пробы №4 из фильтр-kekа ОФ «Щедрухинская» и для пробы №1 из фильтр-kekа ЦОФ «Кузбасская».

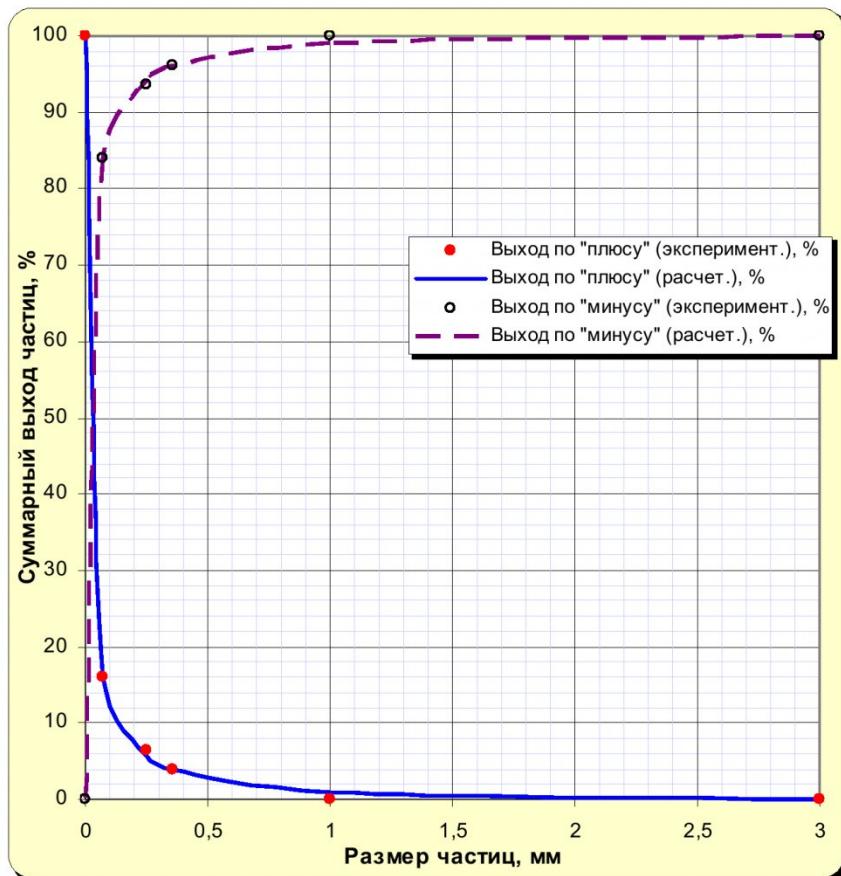
Важнейшим параметром, характеризующим суспензионное угольное топливо, является его низшая теплота сгорания. Низшая теплота сгорания анализируемых проб фильтр-kekов изменялась в основном в интервале от 11,5 МДж/кг (2758 ккал/кг) (фильтр-kek марки «Т» ОФ «Междуреченская») до 14,7 МДж/кг (3518 ккал/кг) (фильтр-kek ОФ «Красногорская») (табл.2). Исключением является проба фильтр-kekа марки «КС» ОФ

Таблица 3. Характеристика суспензионного угольного топлива на основе фильтр-kekов углеобогатительных фабрик Кузбасса

№ п/п	Номер пробы	Золь- ность, A^d , %	Наимено- вание добавки	Добавки от твёрдой фазы, %	Массо- вая доля твёрдой фазы, C_T , %	Гранулометрический состав, классы, мм					Низшая теплота сгорания, Q' , МДж/кг (ккал/кг)
						+0,355	0,250- 0,355	0,160- 0,250	0,071- 0,160	-0,071	
ОФ «Северная»											
1	1	23,6	Тип С	0,1	50,1	4,2	2,7	2,2	7,2	83,7	11,7 (2800)
2	2	24,6	Тип С	0,4	52,9	4,0	2,4	2,5	8,3	82,8	12,3 (2947)
3	3	18,7	Тип С	0,3	52,8	-	-	2,3	3,5	94,2	13,4 (3192)
ЦОФ «Абашевская»											
4	1	26,4	Вариант В2	1,0	68,4	1,5	1,5	14,2	20,0	62,8	14,8 (3549)
ОФ «Щедрухинская»											
5	1	26,2	Вариант В2	1,0	51,7	0,3	1,0	2,0	12,9	83,8	11,5 (2758)
6	2	32,9	Вариант В2	1,0	59,3	1,7	5,4	3,6	23,4	65,9	12,3 (2933)
7	3	31,5	Тип Р	1,0	55,1	0,5	2,4	3,0	20,6	73,5	11,5 (2745)
ОФ «Междуреченская»											
8	1	44,5	Вариант М1	0,31	60,1	0,6	2,5	1,7	19,6	75,6	10,3 (2468)
9	2	53,3	Вариант М1	0,31	62,2	9,1	9,4	3,9	16,9	60,7	9,2 (2205)
ЦОФ «Кузбасская»											
10	1	27,1	Вариант В1	1,0	56,5	-	2,1	1,5	11,9	84,2	13,0 (3118)
ОФ «Красногорская»											
11	1	27,7	Вариант В1	1,0	55,2	0,8	2,0	1,3	11,3	84,6	12,6 (3031)
ОФ «Спутник»											
12	1	29,7	Вариант В2	1,0	63,5	0,4	1,9	5,6	21,0	71,1	13,3 (3190)
13	2	24,0	Тип У _{Красн.}	1,0	60,7	1,0	2,5	6,0	22,0	68,5	13,6 (3258)
14	3	30,0	Вариант В2	1,0	58,5	0,6	1,6	4,2	21,0	72,6	11,9 (2854)

Таблица 4. Реологические модели течения суспензионного угольного топлива на основе фильтр-kekов обогатительных фабрик Кузбасса

№ п/п	№ пробы	Реологические модели течения							Средне- квадрат. отклонение, σ	
		Степенная (псевдопластичная) ($\tau = K \cdot \gamma^n$)				Бинггамовская (вязкопластичная) ($\tau = \tau_0 + \mu_0 \cdot \gamma$)				
		Эффективная вязкость при сдвиге 81 с^{-1} , η , мПа·с	Консис- тент- ность, K, Па·с ⁿ	Индекс потока, n	Средне- квадрат. отклонение, σ	Начальное напряже- ние сдвига, τ_0 , Па	Структур ная вязкость, μ_0 , Па·с			
ОФ «Северная»										
1	1	< 100	-	-	-	-	-	-	-	
2	2	444	1,86	0,71	0,14	16,07	0,30	0,11		
3	3	237	1,30	0,62	0,07	10,11	0,11	0,05		
ЦОФ «Абашевская»										
4	1	356	0,53	0,92	0,04	4,15	0,31	0,04		
ОФ «Щедрухинская»										
5	1	< 100	-	-	-	-	-	-		
6	2	193	0,57	0,76	0,05	6,73	0,11	0,02		
7	4	237	2,32	0,50	0,10	11,64	0,09	0,05		
ОФ «Междуреченская»										
8	1	785	10,12	0,43	0,06	28,67	0,29	0,52		
9	2	474	14,33	0,25	0,13	25,71	0,11	0,35		
ЦОФ «Кузбасская»										
10	1	429	1,87	0,69	0,06	14,86	0,26	0,19		
ОФ «Красногорская»										
11	1	281	0,43	0,90	0,02	4,34	0,22	0,33		
ОФ «Спутник»										
12	1	593	1,03	0,88	0,03	8,96	0,48	0,09		
13	2	533	1,20	0,82	0,06	11,22	0,39	0,16		
14	3	326	0,60	0,86	0,04	7,29	0,24	0,03		



$$W(x) = 100 R \text{ (по «плюсу»)} \quad ; \quad W(x) = 100 (1-R) \text{ (по «минусу»); } R = \exp(-4.685 x^{0.335})$$

Рис. 2. Характеристики гранулометрического состава ВУТ ОФ «Северная»

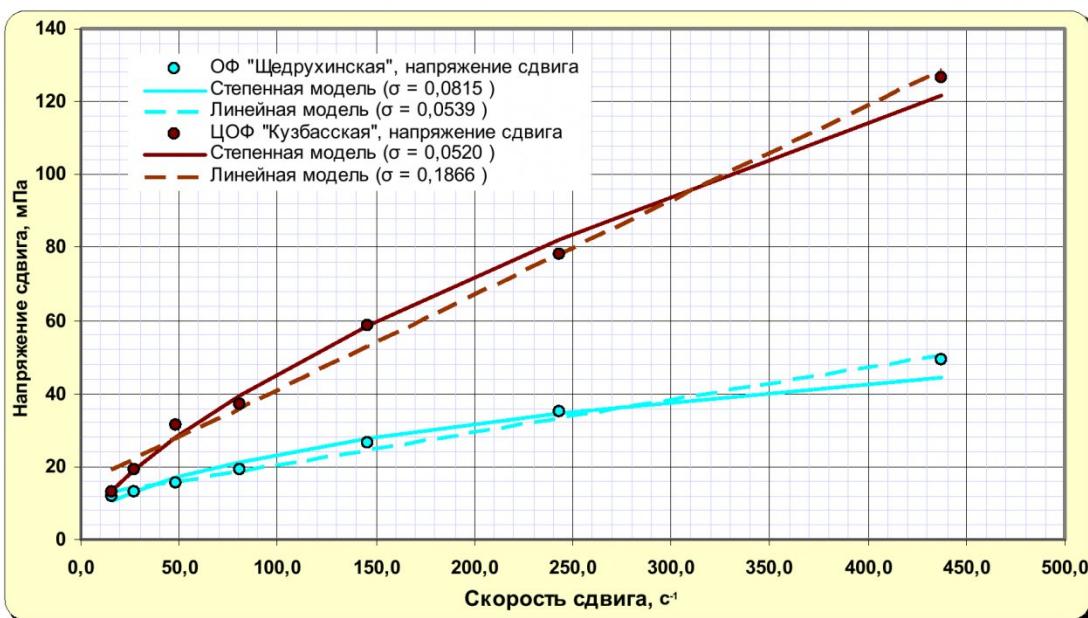


Рис. 3. Реологические кривые течения ВУТ (для проб №4 фильтр-кека ОФ «Щедрухинская» и №1 фильтр-кека ЦОФ «Кузбасская»).

«Межуреченская», низшая теплота сгорания которой составляла 10,0 МДж/кг (2390 ккал/кг). Следовательно, наиболее низкокалорийный

фильтр-kek с ОФ «Межуреченская», а высококалорийный – фильтр-kek с ОФ «Красногорская». Приготовление суспензионного угольного то-

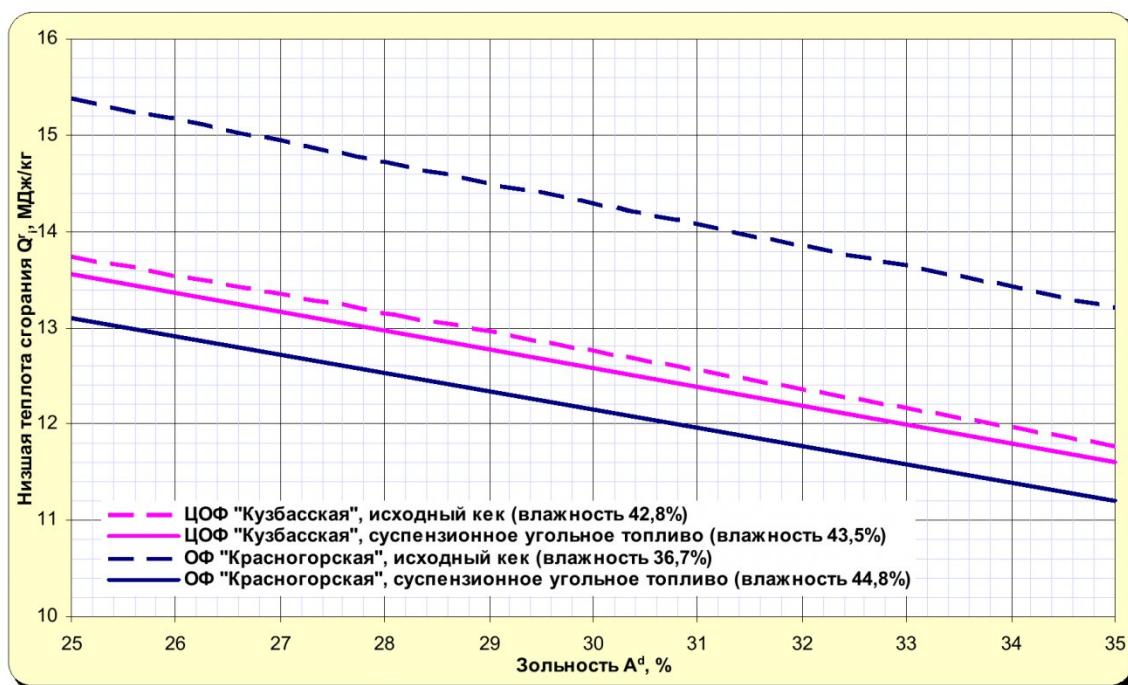


Рис. 4. Зависимость низшей теплоты сгорания от влажности и зольности супензионного угольного топлива и исходного фильтр-кека (ЦОФ «Кузбасская», пробы №1 и ОФ «Красногорская», пробы №1)

плива влечет за собой лишь незначительное относительное уменьшение низшей теплоты сгорания по сравнению с исходным фильтр-кеком (на 1,5 – 15,2 %). В результате получается жидкое топливо, которое можно транспортировать по трубопроводам, в авто- и железнодорожных цистернах, танкерах и т.д., хранить в емкостях и эффективно сжигать используя технологию сжигания путем его распыления через форсунки.

На рис. 4 приведены графики зависимости низшей теплоты сгорания от влажности и зольности супензионного угольного топлива и исходных фильтр-кеков для ЦОФ «Кузбасская» и ОФ «Красногорская», где наблюдалось минимальное и максимальное снижение низшей теплоты сгорания соответственно. Выполненные исследования показали возможность получения супензионного

угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения и фильтр-кеков с необходимыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками:

- массовая доля твердой фазы от 53,0% до 63,0%;
- зольность от 18,0% до 40,0%;
- эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с^{-1} при температуре равной 20°C от 200 мПа·с до 600 мПа·с;
- низшая теплота сгорания ВУТ от 2500 ккал/кг до 3300 ккал/кг;
- гранулометрический состав:
0-250 мм – до 5,0%,
0,071 мм – 60,0% - 80,0%;
- статическая стабильность от 10 до 30 суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.А. Антипенко. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна. Прокопьевск, 2007.
2. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых/ Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. М.: Недра, 1980. – С. 415.

□ Авторы статьи:

Вахрушева
Галина Дмитриевна,
Ведущий инженер СибГИУ,
тел. 89617177488

Карпенок
Виктор Иванович,
старший научный сотрудник
СибГИУ, тел. 89617177459

Мурко
Василий Иванович,
докт.техн.наук., проф., руководитель
лаборатории СибГИУ,
e-mail: sib_eco@kuz.ru

Мастихина
Вера Павловна,
старший научный сотрудник,
СибГИУ, тел. 89617177496

Федяев
Владимир Иванович,
генеральный директор ЗАО НПП
«Сибэкотехника», тел. 89617177459

Дзюба
Дмитрий Анатольевич, старший
научный сотрудник, СибГИУ,
тел. 89617177430