

В.Г. САМОЙЛИК, канд. техн. наук, **Е.И. НАЗИМКО**, д-р техн. наук
(Украина, Донецк, Донецкий Национальный Технический Университет)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Исследованиями технологий получения водоугольного топлива (ВУТ) с заданными реологическими параметрами заняты научно-технические фирмы во многих странах мира [1-6]. Основные направления исследований: разработка технических решений по приготовлению твердой фазы топлива с заданным гранулометрическим составом; получение эффективных пластифицирующих и стабилизирующих химических добавок; разработка специального оборудования с низкой энергоёмкостью для измельчения угля и гомогенизации ВУТ; поиск путей максимального снижения зольности твёрдой фазы ВУТ с целью повышения калорийности топлива.

Последняя задача связана с поиском эффективных схем обогащения угля. В связи с этим, актуальным является разработка технологий обогащения, оказывающих минимальное отрицательное влияние на седиментационную устойчивость и текучесть водоугольного топлива.

Анализ исследований и публикаций. Обогащение может осуществляться как перед измельчением угля, так и непосредственно в процессе получения твердой фазы ВУТ после операции измельчения.

Для обогащения угольной мелочи широко используется флотация. Однако, используемые в процессе флотации реагенты-собиратели отрицательно влияют на реологические параметры получаемых водоугольных суспензий [7,8]. Выполненные исследования показали, что омасливание отрицательно сказывается на агрегативной устойчивости и текучести водоугольных суспензий, снижает эффективность действия реагентов-пластификаторов. При этом отрицательное влияние проявляется тем значительнее, чем выше расход аполярных реагентов.

В связи с этим актуальным является разработка режимов флотации, способствующих снижению воздействия флотационных реагентов на текучесть и устойчивость водоугольных суспензий.

Постановка задачи. Цель работы – отработка методики выбора эффективной технологии флотационного обогащения угольного шлама, используемого для приготовления водоугольного топлива.

Изложение материала и результаты. Учитывая выводы, сделанные в предыдущих наших работах [7,8], выбор технологии флотационного обогащения шлама, используемого для приготовления ВУТ, проводился на основании следующих положений:

- реагенты должны обладать высокой флотационной активностью при малых расходах;

- целесообразно применять реагенты-собиратели с минимальной вязкостью;

- принятый режим флотационного обогащения должен оказывать минимальное отрицательное влияние на реологические свойства ВУТ.

Как ранее было установлено [7], из используемых в настоящее время реагентов-собирателей наименьшее влияние на рост вязкости водоугольных суспензий оказывает керосин и аполярный ароматизированный реагент ААР-2. Термогазойль и топливо печное бытовое (ТПБ) уже при расходах 0,15 % от массы твердого способствуют заметному увеличению вязкости ВУТ.

Для оценки флотационной активности реагентов была выполнена серия экспериментов, в которой наряду с собирателями исследовалось также действие различных вспенивателей: Т-80, КОБС, ВКП-КЭТГОЛ. Опыты проводились во флотационной машине ФМ-1М с объёмом камеры 1000 см³ при постоянных значениях расхода воздуха и скорости вращения импеллера. Содержание твердого в пульпе при флотации во всех опытах составляло 120 кг/м³. Расход реагентов во всех опытах соответствовал средним значениям для углей марки Д: $q_c = 2,0$ кг/м³, $q_b = 0,165$ кг/м³. Результаты разделения при флотации оценивались с помощью коэффициента эффективности по М. В. Циперовичу:

$$E = \gamma_k * A_{отх}^d / A_k^d \quad (1)$$

Для повышения степени достоверности результатов опыты дублировались. Средние значения коэффициентов эффективности, полученные при различных сочетаниях реагентов, представлены в табл.1.

Таблица 1. Значения коэффициентов эффективности по М. В. Циперовичу

Вспениватели	Собиратели			
	Керосин	ААР-2	ТПБ	Термогазойль
КОБС	362	629	384	375
Т-80	230	615	296	284
КЭТГОЛ	425	596	475	445

Из полученных данных следует, что минимальной флотационной активностью обладает осветительный керосин. При любых сочетаниях керосина с реагентами-вспенивателями коэффициент эффективности флотации шлама минимален. Зольность отходов не превышает 58 %, выход концентрата – менее 65 %. Более высокие значения показателей флотации при подаче керосина в смеси с ВКП-КЭТГОЛ объясняется тем, что последний, наряду с пенообразующими, обладает собирательными свойствами и как бы дополняет недостаточную активность собирателя. Значения коэффициента эффективности в области 550 – 610 при флотации с использованием керосина были получены только в результате увеличения расхода собирателя до 2,7 – 3,0 кг/т твердого.

Наилучшие показатели флотации соответствуют подаче во флотационную пульпу реагентов ААР-2 и КОБС. Выход концентрата при зольности 9,64 % и

зольности отходов 78,68% составил 77,1%. В сочетании с другими вспенивателями применение ААР-2 также способствует получению высоких значений коэффициента эффективности флотации.

Сравнительно низкая флотационная активность собирателей ТПБ и термогазоля, заметное отрицательное воздействие их на реологические свойства водоугольных суспензий [7,8] делают нецелесообразным применение этих реагентов в процессе получения твердой фазы ВУТ. Так же, по-видимому, не следует использовать для этих целей керосин. Более слабое, по сравнению с ААР-2, влияние его на вязкость ВУТ нивелируется за счет повышенного расхода собирателя, необходимого для эффективного ведения флотации.

Следовательно, наиболее приемлемым для применения в процессе производства ВУТ из исследуемых собирателей является ААР-2. Все последующие эксперименты проводились с использованием реагентов ААР-2 и КОБС.

Наряду с подбором эффективного собирателя для флотации важной задачей является разработка технических решений по сокращению его расхода. Нами исследовались единовременная и дробная дозировка собирателя, раздельное кондиционирование грубодисперсной и тонкодисперсной фракций угля, парообразная подача реагента.

При дробной дозировке 70 % ААР-2 вводилось в пульпу в процессе перемешивания, а 30 % - через 2 минуты флотации. Раздельное кондиционирование осуществлялось путём обработки аполярным реагентом материала крупностью более 0,2 мм в камере флотомашин с последующим введением в неё фракции крупностью 0 – 0,2 мм. Перемешивание обеих фракций проводилось в течение 1,5 минут, после чего в пульпу дозировался вспениватель. Подача собирателя в парообразном виде в пульпу при перемешивании перед флотацией осуществлялась с помощью испарителя по методике, описанной в работе [9].

Режим работы флотационной машины, содержание твердого в пульпе (120 кг/м^3) и расход КОБС ($0,165 \text{ кг/т}$) во всех опытах были неизменны. Варьировался расход ААР-2 и способ подачи его в камеру флотомашин.

Полученные данные (табл. 2) свидетельствуют о том, что наиболее эффективным являются дробная подача и дозировка собирателя в виде пара. Использование этих способов позволяет получать хорошие показатели разделения при снижении расхода ААР-2 на 25 %. Значения коэффициентов эффективности в этих случаях даже несколько превышают величину $E = 629$, полученную при единовременной подаче 2 кг/т собирателя в жидком виде.

Учитывая недостаточно широкую апробацию способа паровой подачи собирателя на флотацию, более предпочтительным при обогащении шлама, используемого для приготовления твердой фазы ВУТ, следует считать дробную подачу реагента.

С учетом полученных результатов была выполнена отработка оптимального режима флотации шлама.

Таблица 2. Результаты флотации угольного шлама при различных способах подачи аполярного реагента

Способ дозирования собирателя	Расход ААР-2, кг/т	Зольность продуктов, %			Выход концентрата, %	Коэффициент эффективности, E
		концентрат	отходы	исходный		
Единовременная подача	2,0	9,64	78,68	25,45	77,1	629
	1,5	9,03	65,62	25,27	71,3	518
Раздельное кондиционирование	2,0	9,60	81,72	25,61	77,8	662
	1,5	8,98	70,58	25,49	73,2	573
Дробная подача	2,0	9,51	83,81	25,41	78,6	693
	1,5	9,26	79,35	25,38	77,0	660
Подача в виде пара	2,0	9,48	83,46	25,46	78,4	690
	1,5	9,22	78,70	25,41	76,7	655

Выполненными ранее исследованиями [10] было установлено, что снижение зольности угля способствует улучшению реологических характеристик ВУТ. Следовательно, при разработке технических решений по приготовлению твердой фазы ВУТ необходимо стремиться к максимально возможной степени обеззоливания угля. Анализ кривых флотиремости показал, что из исследуемого шлама можно получить концентрат зольностью 3,6 % при выходе 68,5 %.

Как следует из данных табл. 2, при одностадийной флотации зольность концентрата существенно превышает минимально возможную величину. Результаты предварительных исследований показали, что при перечистке пенного продукта основной флотации зольность концентрата снижается до 4,5 – 5,0 %.

Применение второй перечисточной операции незначительно улучшает качество концентрата, но при этом зольность камерного продукта приближается к зольности исходного шлама. В связи с этим, за основу для выбора оптимального режима флотации была взята схема с одностадийной перечисткой пенного продукта.

Определение оптимальных условий флотации шлама проводилось на основании дробного факторного эксперимента с последующим применением метода крутого восхождения. В качестве варьируемых факторов приняты:

X_1 – расход вспенивателя при основной флотации, кг/т;

X_2 – расход вспенивателя при перечисточной флотации, кг/т;

X_3 – расход собирателя при основной флотации, кг/т;

X_4 – содержание твердого в пульпе при основной флотации, кг/м³;

X_5 – расход собирателя при перечисточной флотации, кг/т;

В качестве функции отклика использовался коэффициент эффективности по М. В. Циперовичу (1).

За основной уровень варьируемых факторов были приняты значения, полученные в результате предварительных исследований.

Для исключения влияния систематической ошибки проводилась рандомизация экспериментов: опыты осуществлялись в последовательности, определенной по таблице случайных чисел.

Матрица ДФЭ 2^{5-2} и опыты крутого восхождения представлены в табл. 3.

Таблица 3. ДФЭ 2^{5-2} и опыты крутого восхождения

Показатели	Факторы					Функция отклика, E
	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	X ₁	
Основной уровень	0,165	0,065	1,50	120	0,50	
Интервал варьирования	0,035	0,065	0,50	20	0,50	
Верхний уровень	0,200	0,130	2,00	140	1,00	
Нижний уровень	0,130	0	1,00	100	0	
Опыт 1	+	+	+	+	+	1033
Опыт 2	-	+	+	+	-	1123
Опыт 3	+	-	+	-	-	1236
Опыт 4	-	-	+	-	+	1257
Опыт 5	+	+	-	-	-	1173
Опыт 6	-	+	-	-	+	874
Опыт 7	+	-	-	+	+	864
Опыт 8	-	-	-	+	-	753
Нулевые опыты	0	0	0	0	0	1178
	0	0	0	0	0	1195
	0	0	0	0	0	1147
Коэффициенты	37	-	123	- 96	-	
Рабочий шаг	0,01	-	0,50	- 16	-	
Опыты крутого восхождения						
Опыт 1	0,170	0	1,75	112	0	1234
Опыт 2	0,175	0	2,00	104	0	1285
Опыт 3	0,180	0	2,25	96	0	1216
Опыт 4	0,185	0	2,50	88	0	1123

По данным факторного эксперимента вычислялась дисперсия воспроизводимости опытов, находились коэффициенты линейной модели вида

$$E = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5. \quad (2)$$

Оценка значимости коэффициентов показала, что незначимыми являются коэффициенты $a_2 = 11,6$ и $a_5 = - 32,1$ (т. к. при принятой доверительной вероятности $P = 95 \%$ предельная величина $a_{i \text{ пред.}} = 36,9$). В связи с этим функция отклика описывается следующим выражением:

$$E = 1039 + 37X_1 + 123X_3 - 96X_4. \quad (3)$$

Проверка адекватности модели показала, что расчетное значение критерия Фишера меньше табличного: $F = 19,0$; $F_T = 19,16$.

На основании полученной адекватной модели определялся рабочий шаг по каждому фактору для опытов крутого восхождения. Значения X_2 и X_5 фиксировались на нижнем уровне. Для постепенного движения по градиенту факторы изменялись на полшага. Максимальная эффективность получена во втором опыте: $E = 1285$. При выполнении следующих шагов эффективность снижается, что свидетельствует о достижении почти стационарной области.

Таким образом, при флотации исследуемого шлама оптимальными являются следующие условия:

- содержание твердого в пульпе на основной флотации – 104 кг/м^3 ;
- расход вспенивателя КОБС – $0,175 \text{ кг/т}$;
- расход собирателя ААР-2 – 2 кг/т при дробной подаче в процесс флотации;
- перечистная флотация ведётся без добавления флотационных реагентов.

Ведение процесса флотации в принятом режиме позволит получить концентрат зольностью $4,48 \%$ с выходом 72% при суммарной зольности отходов более 77% . При флотации без перечистки пенного продукта зольность концентрата составит $9,28 \%$, а выход – $78,1 \%$.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, в результате выполненных исследований отработана методика выбора эффективного режима флотационного обогащения угольного шлама, используемого для приготовления ВУТ:

- подбор эффективного реагента-собирателя с учетом его вязкостных характеристик и флотационной активности;
- выбор способа подачи собирателя и схемы флотационного обогащения;
- отработка оптимального режима флотации, способствующего получению твердой фазы водоугольного топлива с низким уровнем зольности.

Данная методика может быть использована при выборе технологии флотационного обогащения шлама углей различных марок в процессе приготовления водоугольного топлива.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку технологий обогащения углей, способствующих получению твердой фазы ВУТ с заданным уровнем зольности.

Список литературы

1. Карпов Е. Г. Водоугольное топливо – топливо будущего//Энергетика и промышленность России. – 2007. - № 5.
2. Листратов И. В. и др. Опыт промышленного внедрения чистой угольной технологии кипящего слоя на водоугольном топливе/ И. В. Листратов, Г. Н. Делягин, А.С. Кондратьев, Б. А. Сараф, Ю.А. Ильин // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 5.
3. Фомина О. Перспективы применения водоугольного топлива в Украине и мире// Технологии. – 2008. – № 3.

4. **Баранова М. П.** Совершенствование технологии получения водоугольных суспензий//Дис. канд. техн. наук. – Красноярск. – 2006. – 115 с.
5. **Морозов А. Г., Коренюгина Н. В.** Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива// Новости теплоснабжения. – 2010. – №7. – С.18-21.
6. **Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka.** Handbook of alternative fuel technologies//CKC Press. - New York. - 2007.
7. **Самойлик В.Г., Назимко Е.И.** Исследование воздействия аполярных реагентов на текучесть водоугольных суспензий// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 50 (91). – С. 147-153.
8. **Самойлик В.Г.** Исследование влияния омасливания угольной поверхности на эффективность действия реагентов-пластификаторов// Вісник Криворізького національного університету: Збірник наукових праць – 2012. – Вип. 33. – С. 121-123.
9. **Самойлов А. И.** Разработка технологии обработки флотируемых минералов аполярными реагентами-собираателями//Дис. канд. техн. наук. – Донецк.– 1989. – 162 с.
10. **Елишевич А.Т. и др.** Исследование влияния содержания минеральных примесей на реологические свойства водоугольных суспензий / А.Т. Елишевич, Н.Г. Корженевская, В.Г. Самойлик, С.Л. Хилько // Химия твердого топлива. - 1988 - №5 - С. 130-133.

*Рукопись поступила в редколлегию _____
Рекомендована к опубликованию д.т.н. Белецким В.С.*