

УДК 622.765.061.5

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ЭМУЛЬСИИ МАСЛЯНЫХ РЕАГЕНТОВ
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ФЛОТАЦИИ УГЛЯ**

Т. Е. Вахонина¹, М. С. Клейн¹, Ю. Ф. Патраков², С. А. Семенова²

¹*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: m_klein@mail.ru, ул. Весенняя, 28, 65000, г. Кемерово, Россия*

²*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Институт угля СО РАН),
E-mail: yurat@icc.kemsc.ru, просп. Ленинградский, 10, 65005, г. Кемерово, Россия*

Описан метод лазерной дифракции для оценки дисперсности эмульсий масляных реагентов в экспериментальных и технологических исследованиях процесса флотации угольных шламов. Приведены результаты влияния интенсивности перемешивания при эмульгировании на дисперсность эмульсий и показатели флотации частиц разной крупности двух марок угля. Выявлено влияние эмульгирования масляных реагентов на флотационную активность. Повышение дисперсности эмульсии смеси термогазойля и отработанного моторного масла положительно воздействует на флотацию крупных и мелких частиц угля обеих марок, а при флотации эмульсией отработанного моторного масла показатели процесса ухудшаются. Возможно снижение селективности разделения крупных частиц менее гидрофобного угля.

Лазерная дифракция, масляные реагенты, эмульгирование, уголь, флотация

DOI: 10.15372/FTPRPI20200520

При флотации полезных ископаемых вместе с ионогенными собирателями применяются неионогенные аполярные: керосин, газойль, минеральные масла и другие углеводороды, являющиеся основными собирателями при флотации природно-гидрофобных угольных шламов. Во флотационной пульпе аполярные собиратели присутствуют в капельном виде. При столкновении и закреплении на частицах минералов капли масла растекаются, покрывают минеральную поверхность гидрофобной пленкой и обеспечивают прилипание омасленных частиц к пузырькам воздуха. Дисперсный состав эмульсии в пульпе определяет флотационную активность используемого реагента.

Распределение капель масла по крупности во флотационной пульпе влияет на многие показатели взаимодействия капель с частицами твердой фазы. Вероятность адсорбции капель микронного размера на минеральной поверхности низкая, они могут поглощаться в поры и трещины, не образуя масляных пленок на поверхности. Присутствие в пульпе большого количества крупных капель нежелательно: в них сосредотачивается большая часть дисперсной фазы, со-

Экспериментальные исследования дисперсности эмульсий и угольных шламов проведены с использованием приборной базы ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

крашается число обработанных реагентом частиц и нарушается селективность процесса [1, 2]. В зависимости от granulометрического состава твердой фазы, флотуемости угля и других характеристик флотационной пульпы оптимальным размером капель при флотации угля считается диапазон крупности 3–20 мкм [3].

Для определения дисперсности эмульсии масляных собирателей в воде применен новый метод лазерной дифракции, имеющий преимущества по сравнению с классическими оптическими методами: высокую скорость и точность выполнения анализа; способность устанавливать крупность капель в широком диапазоне размеров; программное обеспечение, позволяющее рассчитать форму капель и определить расчетные величины средних диаметров капель; высокую точность и воспроизводимость результатов анализа [4].

Оценка дисперсности эмульсии проводилась на лазерном дифракционном анализаторе Analysette 22 Comfort производства компании Fritsch GmbH, Laborgerätebau (Германия), использующем физический принцип дифракции электромагнитных волн: параллельный свет лазера рассеивается под фиксированными пространственными углами, зависящими от размера и оптических свойств капель. За счет изменения положения измерительной ячейки, уменьшения или увеличения расстояния между ячейкой и детектором появляется возможность измерять более мелкие или крупные капли. После перемещения через измерительную ячейку эмульсия проходит сквозь лазерный луч, свет которого рассеивается пропорционально размеру капель и посредством линзы фокусируется на детекторе. Программное обеспечение позволяет вычислять распределение капель по размерам с помощью комплекса математических методов согласно теориям Фраунгофера или Ми. Получаются объемные доли, соответствующие эквивалентным диаметрам при лазерной дифракции [5].

С целью повышения точности измерений на каждой пробе эмульсии проводилось последовательное пятикратное сканирование с включением ультразвука для очистки поверхности. Для оценки результатов измерений используются:

- накопительная кривая распределения $Q_3(x)$, которая указывает на распределение общего количество капель с эквивалентным диаметром, меньшим и равным x . При построении интегральной кривой на графике откладываются значения Q_{3i} для всех фракций, начиная с наименьшего размера капель, а на оси абсцисс — размер x_i ;

- кривая плотности распределения $dQ_3(x)$ — первая производная $Q_3(x)$. Дифференциальная кривая строится после аналитического или графического дифференцирования интегральной кривой распределения.

По графикам определяются два параметра для характеристики экспериментальных результатов:

- медиана d_{50} , демонстрирующая значение размера капель менее 50% и долю капель медианного размера;

- мода d_m , показывающая размер капель, при котором кривая q достигает своего максимума, и долю капель модального размера [5].

В экспериментальных исследованиях по определению дисперсного состава эмульсии методом лазерной дифракции в качестве масляных реагентов использовались отработанное моторное масло (ОММ) и смесь термогазойля и отработанного моторного масла (СР) при равном весовом соотношении. Характеристики реагентов приведены в табл. 1: вязкость η и плотность ρ при 20 °С, поверхностное натяжение на границе “жидкость – жидкость” σ и краевой угол смачивания θ капли реагента на поверхности угля в воде, измеренный через масляную фазу.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики масляных реагентов

Реагент	Вязкость, мм ² /с	Плотность, кг/м ³	Поверхностное натяжение, 10 ⁻³ , Н/м	Краевой угол смачивания, град
ОММ	112.0	873	38.3	107
СР	16.7	905	34.6	86

Эмульсия изготавливалась в прямоугольной камере при объемной концентрации дисперсной фазы $\varphi = 0.12\%$ путем перемешивания турбинной мешалкой диаметром $d_m = 34$ мм. Проба исследуемой эмульсии отбиралась после отстаивания через определенный интервал времени шприцом.

Анализ результатов измерений дисперсности эмульсий масляных собирателей показывает, что средний диаметр каплей d_k дисперсной фазы — функция диссипации энергии \mathcal{E} и поверхностного натяжения на границе раздела “масло – вода” σ : $d_k \sim \sigma^{0.6} \mathcal{E}^{-0.4}$ [6]. В аппарате с механическим перемешиванием деформация и дробление каплей масла происходят под воздействием разности динамических напоров, которые зависят от диссипации энергии (интенсивности перемешивания) и обеспечивают вовлечение вязких реагентов при эмульгировании.

Изучено влияние на дисперсность эмульсии интенсивности перемешивания при постоянном времени эмульгирования 2 мин и числе оборотов мешалки 1000, 2500 и 4000 мин⁻¹, скорость вращения которой регулировалась частотным устройством. Результаты измерений дисперсного состава эмульсий ОММ и СР показаны в табл. 2, а кривые плотности распределения каплей эмульсии — на рис. 1.

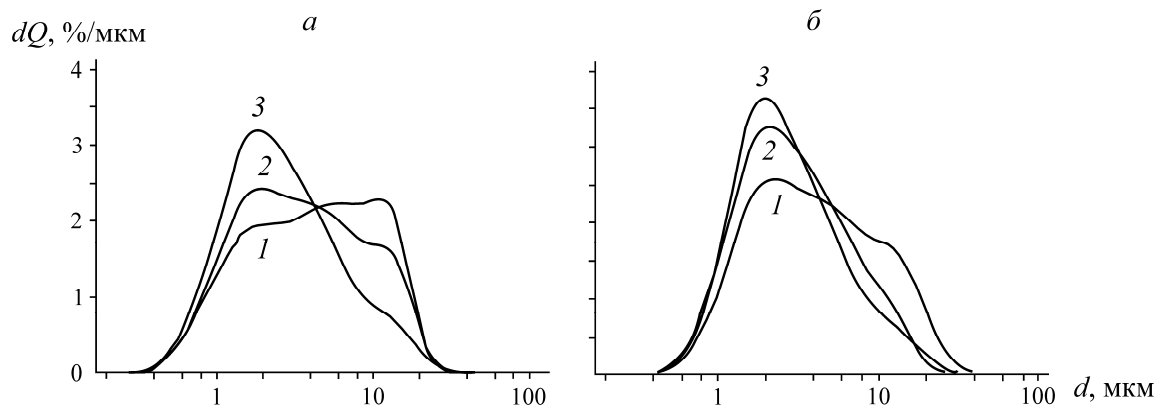


Рис. 1. Кривые плотности распределения каплей эмульсии ОММ (а) и смеси СР (б) по крупности при скорости перемешивания 1000 (1), 2500 (2) и 4000 мин⁻¹ (3)

Анализ полученных результатов измерений дисперсности эмульсий масла показывает, что с увеличением интенсивности перемешивания она повышается: среднеарифметический диаметр каплей d_{cp} уменьшается на 2.1 мкм, а среднеобъемный диаметр каплей d_v — на 3 мкм. Характер распределения дисперсного состава эмульсий для двух проб одномодальный, а при скорости перемешивания 1000 об./мин — бимодальный. Значение моды снижается, количество каплей модального размера растет. Аналогичные закономерности характерны и для медианных значений (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений дисперсности эмульсий

Оборот, мин ⁻¹	Мода d_m		Медиана d_{50}		Средний диаметр, мкм	
	мкм	%	мкм	%	d_{cp}	d_v
ОММ						
1000	2.31 / 10.73*	1.94 / 2.36*	4.32	2.16	5.82	9.93
2500	1.86	2.43	3.34	2.28	4.01	7.47
4000	1.86	3.22	2.93	2.78	3.87	7.25
СР						
1000	2.27	2.57	3.76	2.39	5.66	9.27
2500	2.11	3.25	2.80	3.15	3.92	7.14
4000	2.07	3.63	2.41	3.47	3.64	6.65

*Бимодальная кривая плотности распределения

При эмульгировании СР с теми же скоростями перемешивания наблюдается небольшое повышение дисперсности эмульсии по сравнению с эмульсией ОММ, что объясняется меньшим поверхностным натяжением СР на границе “масло – вода” (табл. 2). Отношение $(\sigma_{ОММ} / \sigma_{СР})^{0.6}$ равно 1.034, чему должно соответствовать и уменьшение среднего диаметра капель СР относительно ОММ. По экспериментальным результатам среднее значение уменьшения размера капель при трех скоростях перемешивания составляет 1.037.

В табл. 3 показано процентное распределение масляных капель по классам крупности при различной интенсивности перемешивания. При повышении скорости перемешивания с 1000 до 4000 мин⁻¹ в процессе эмульгирования реагентов ОММ и СР дисперсность эмульсий возрастает, увеличивается доля мелких капель, а доля крупных снижается. С изменением скорости перемешивания происходит перераспределение доли капель и объема дисперсной фазы по классам крупности, что позволяет подобрать необходимый режим эмульгирования для улучшения показателей флотации шламов.

ТАБЛИЦА 3. Распределение капель эмульсии по классам крупности, %

Оборот, мин ⁻¹	Доля капель в классе крупности, мкм					
	< 3	3 – 6	6 – 10	10 – 15	15 – 20	> 20
ОММ						
1000	39.50	23.59	16.93	11.95	5.32	2.71
2500	46.56	24.03	13.37	9.51	4.56	1.96
4000	58.95	23.19	9.08	4.50	3.14	1.15
СР						
1000	42.02	25.40	15.14	9.76	5.39	2.29
2500	53.76	24.32	11.90	5.27	3.53	1.21
4000	59.10	25.43	9.03	3.98	1.81	0.66

При исследовании влияния дисперсного состава эмульсии масляных реагентов на результаты флотации угольных шламов эмульгирование реагентов проводилось в тех же условиях, что и дисперсный состав эмульсий. Для изготовления эмульсии в камеру эмульгирования добавлялось необходимое при проведении флотоопыта количество реагента. Перед началом флотации эмульсия полностью переводилась в камеру механической машины объемом 1 л и перемешивалась.

валась с пульпой в течение 10 с. В опытах без предварительного эмульгирования дробление капель реагента происходило только в камере флотомашины, поэтому условно скорость эмульгирования равна нулю.

Флотационные исследования проводились на двух фабричных пробах питания флотации угольных шламов марок СС и КС, отличающихся флотируемостью, гранулометрическим составом и зольностью (табл. 4). Содержание твердого в пробах составляло 62 и 101 г/л.

ТАБЛИЦА 4. Гранулометрический состав угольных шламов марок СС и КС, %

Класс, мм	Марка СС		Марка КС	
	γ	A^d	γ	A^d
+0.450	0.4	7.2	10.6	4.1
0.315–0.450	0.4	7.9	11.5	4.9
0.125–0.315	5.5	8.4	21.2	7.0
0.045–0.125	21.8	13.9	24.6	15.5
Итого +0.045	27.9	12.7	67.9	9.3
Итого –0.045	72.1	38.0	32.1	23.3
Всего	100.0	30.9	100.0	13.8

Образцы углей аналитической крупности < 0.2 мм марок КС и СС, подвергающиеся обогащению, исследованы методом дифференциального распределения крупности частиц для уточнения результатов гранулометрического анализа шламов. На кривых плотности распределения частиц угля наблюдается полимодальное распределение с тремя четко выраженными максимумами в области 10–30, 30–50 и 50–100 мкм и одним слабоинтенсивным максимумом в области мелких фракций < 10 мкм (рис. 2). Отличие дисперсного состава аналитической пробы угля марки СС — присутствие большего количества (на 14 %) частиц наименьшего размера (< 30 мкм), что на кривой плотности распределения по крупности фиксируется увеличением площади под кривой в области 1–30 мкм.

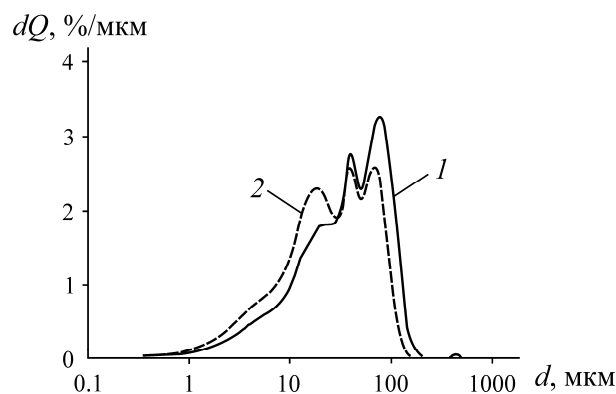


Рис. 2. Кривые плотности распределения частиц по крупности углей марки КС (1) и СС (2)

Наличие тонкодисперсных частиц угля влияет на снижение значений численных характеристик пробы: среднеарифметического диаметра и медианы (табл. 5). Уголь марки СС, являющийся источником формирования шлама для флотации при его обогащении, обладает пониженной механической прочностью и образует при измельчении и истирании большее количество мелких фракций, чем уголь марки КС.

ТАБЛИЦА 5. Численные характеристики фракционного состава аналитической угольной пробы (<0.2 мм)

Марка угля	Доля частиц в составе пробы с размером (мкм), % отн.					$d_{ар}$, мкм	Медиана, мкм	Мода, мкм	Дифференциал моды, %/мкм
	< 10	10–30	30–50	50–100	> 100				
КС	14.17	28.59	19.55	31.31	6.38	46.09	38.01	21.80/38.90/79.40	1.82/2.78/3.26
СС	20.77	35.95	18.35	23.18	1.75	34.74	24.81	19.12/38.96/69.73	2.30/2.57/2.58

Во флотационных опытах использовались эмульсии реагентов, приготовленные при скоростях вращения мешалки 1000, 2500 и 4000 мин⁻¹ в течение 2 мин, когда более вязкий реагент ОММ полностью диспергируется. При флотации угля марки СС расход ОММ равнялся 5 кг/т, расход СР — 3.5 кг/т. Для марки КС расход ОММ составил 3.8 кг/т, расход СР — 1.9 кг/т. Эффективность флотации шламов оценивалась в каждом опыте по следующим показателям: выходу γ и зольности A^d концентрата и отходов флотации; выходу и зольности классов крупности в концентрате и отходах флотации; извлечению горючей массы в концентрат E от классов крупности и коэффициенту селективности $K_{сел} = (A_{отх}^d - A_k^d) / (100 - A_{исх}^d)$.

На рис. 3 показаны результаты флотации угольных шламов эмульсиями собирателя, полученными при разной диссипации энергии (скорости вращения мешалки) при эмульгировании. Использование смеси реагентов подтверждает положительное влияние эмульгирования масляных реагентов на показатели флотации шламов за счет увеличения числа капель в пульпе и более равномерной адсорбции на поверхности угольных частиц. С повышением дисперсности эмульсии при флотации угля марки КС выросли выход концентрата на 32 % и зольность отходов на 25 %. Менее заметное улучшение показателей флотации наблюдается на угле марки СС (выход концентрата вырос на 6 %, а зольность отходов — на 8 %), так как поверхность частиц слабоспекающихся углей менее гидрофобна, а толщина и упорядоченность гидратных слоев у поверхности выше. При уменьшении размера капель положительный эффект от увеличения их количества и закрепления на угольной поверхности ниже: вероятность прорыва пленки жидкости за время контакта частицы и капли снижается [2].

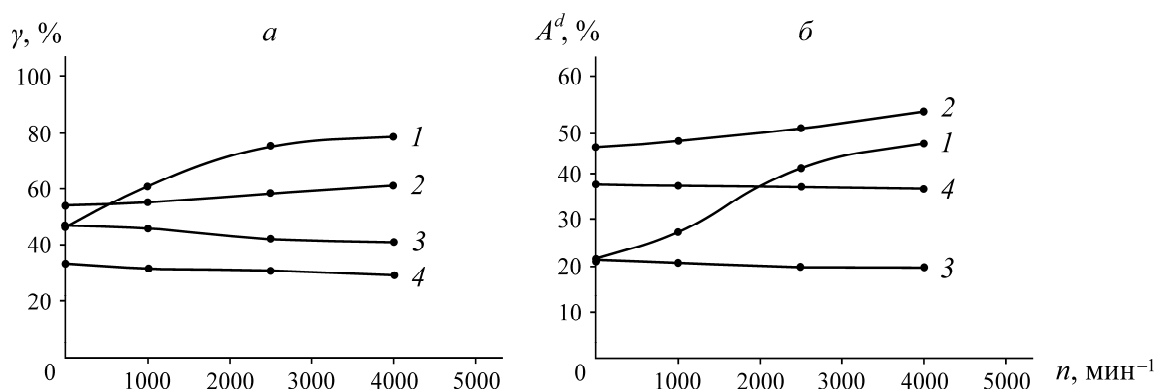


Рис. 3. Влияние скорости перемешивания на выход концентрата (а) и зольность отходов (б) при флотации угля марки КС (1, 3) и СС (2, 4) эмульсией ОММ (3, 4) и смеси (1, 2)

При флотации углей обеих марок эмульсиями отработанного масла эмульгирование масла отрицательно влияет на результаты флотации и выход концентратов снижается на 4–6 % (рис. 3) из-за плохой смачиваемости вязким маслом угольной поверхности. Измерение краевых

углов смачивания каплей ОММ и СР показало, что масло хуже растекается по поверхности угля в воде и образует большой угол смачивания, измеренный через масляную фазу. При установлении контакта между каплей масла и частицей растеканию капли могут препятствовать вязкие гистерезисные силы в тонких слоях масла при перемещении трехфазного периметра. С ростом вязкости масла гистерезисные силы, замедляющие передвижение периметра контакта, увеличиваются [7, 8]. При уменьшении размера каплей резко повышается капиллярное давление внутри капли, обратно пропорциональное ее радиусу, что может затруднять изменение формы капли и растекание. В результате мелкие капли вязкого масла не образуют масляное покрытие поверхности частиц угля, не создают прочного контакта с частицами и могут десорбировать в турбулентных потоках пульпы.

Проведено сравнение влияния дисперсности эмульсии на эффективность флотации крупных $+0.045$ мм и мелких -0.045 мм частиц угля, содержание и зольность которых в питании флотации показана в табл. 3. Для оценки флотируемости частиц использовалось извлечение горючей массы в концентрат от каждого класса крупности по формуле

$$E_k^{ГМ} = 100\gamma_k^{кл} (100 - A_k^{d_{кл}}) / [\beta^{кл} (100 - A_{исх}^{d_{кл}})],$$

где $\gamma_k^{кл}$ — выход частиц узкого класса концентрата, %; $A_k^{d_{кл}}$ — зольность частиц узкого класса в концентрате, %; $\beta^{кл}$ — содержание узкого класса в питании, %; $A_{исх}^{d_{кл}}$ — зольность частиц узкого класса в питании, %.

При флотации шламов угля марки КС смесью реагентов с повышением дисперсности эмульсии наибольший прирост извлечения на 52 % и зольности отходов на 48 % наблюдается для мелких частиц (рис. 4).

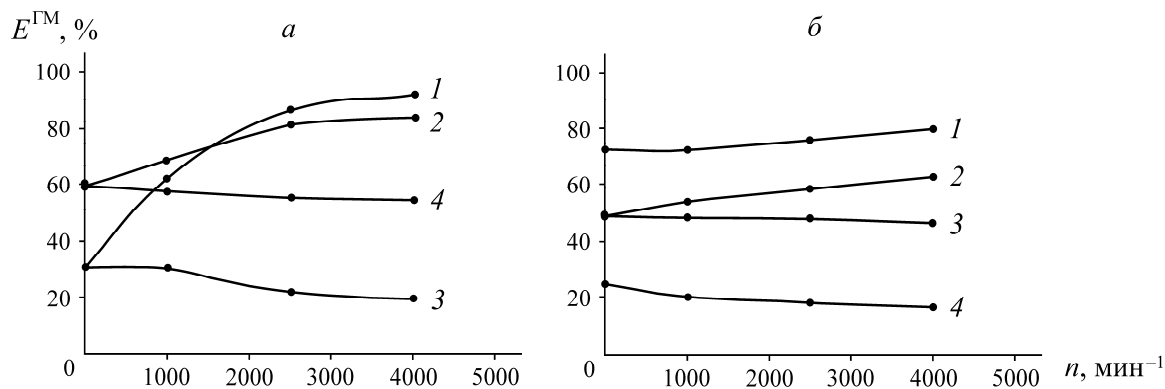


Рис. 4. Влияние скорости перемешивания на извлечение горючей массы в концентрат крупностью $+0.045$ мм (2, 4) и -0.045 мм (1, 3) при флотации угля марки КС (а) и СС (б) эмульсией СР (1, 2) и ОММ (3, 4)

Мелкие частицы угля в определенных условиях в большом количестве прилипают к пузырькам воздуха, что противоречит общепринятому положению о низкой эффективности флотации мелких частиц из-за малой вероятности столкновения и закрепления микрокапель на микрочастицах, как и микрочастиц на пузырьках по механизму зацепления [9]. Элементарный акт флотации мелкой частицы, т. е. закрепление на пузырьке воздуха, имеет два пути:

- омасливание частицы и образование флотационного комплекса после столкновения с пузырьком;
- формирование омасленного пузырька и прилипание к нему мелкой частицы.

Более предпочтителен второй механизм. При флотации в механической машине вероятность образования омасленных пузырьков высока. В зоне импеллера с высокой степенью турбулентности пульпы омасливание пузырьков происходит в результате столкновения с микрокаплями масла, доля которых в эмульсии резко возрастает при повышении интенсивности перемешивания во время эмульгирования. Капля масла закрепляется на пузырьке, затем растекается и формирует тонкую масляную пленку толщиной 10^{-8} м, меньше которой она становится неустойчивой. В зависимости от размера пузырьков и капель масла поверхность пузырьков покрывается пленкой полностью или частично [10, 11].

При небольшой разнице в плотности масла и воды столкновение мелких капель с преградой в перемешиваемой пульпе происходит по механизму турбулентной диффузии. В [12] показано, что число Прандтля имеет более высокую степень в диффузионном потоке на преграду с подвижной поверхностью (пузырек), чем в потоке на поверхность твердой сферы (частица). При одинаковых числах Рейнольдса диффузионный поток на пузырек больше, чем на твердую частицу. Это связано с более благоприятными условиями размешивания жидкости вблизи поверхности пузырька, чем у поверхности твердой частицы. В [13] рассмотрено утончение жидких пленок с тангенциально подвижными поверхностями и отмечается, что подвижность поверхностей раздела повышает скорость их взаимного сближения.

При увеличении скорости вращения мешалки в процессе эмульгирования с 1000 до 4000 мин^{-1} среднеобъемный диаметр капель уменьшился на 2.6 мкм (табл. 2), а количество капель в эмульсии выросло в 3 раза. Число столкновений мелких капель масла с пузырями воздуха возрастает при повышении дисперсности эмульсии, увеличивается количество омасленных пузырьков, что приводит к более высокой скорости флотации микрочастиц угля при наличии свободной поверхности на пузырьках воздуха и недостаточной подготовленности к флотации зернистой части угля.

Флотация крупных частиц угля отличается избирательностью и недостаточной флотиремостью этих частиц: на прилипшие к пузырькам частицы действуют силы отрыва, пропорциональные кубу размера частиц, а прочность прилипания пропорциональна длине периметра контакта, т. е. размеру частиц в первой степени. Для прочного закрепления крупных частиц на пузырьках и эффективной флотации необходима повышенная плотность покрытия поверхности угля собирателем [14].

При увеличении дисперсности эмульсии аполярного собирателя растет количество капель реагента и адсорбционное гидрофобное покрытие на угольной поверхности. В результате извлечение крупных частиц в концентрат повышается (рис. 4а).

При флотации шламов угля марки КС вязким отработанным маслом при уменьшении размера масляных капель происходит снижение извлечения в концентрат и зольности в отходах крупных и мелких частиц угля (рис. 5а). Это объясняется меньшей вероятностью закрепления мелких капель масла на частицах из-за плохой смачиваемости угля маслом, а также столкновениями и закреплениями частиц на омасленных пузырьках воздуха. Положительный эффект, появляющийся при использовании СР за счет роста числа капель, в данном случае не достигается [15]. Аналогичные закономерности влияния роста дисперсности эмульсии на показатели флотации наблюдаются на трудно флотлируемых шламах угля марки СС (рис. 5б). Повышенное содержание тонких шламов и высокая зольность в питании флотации этих углей отрицательно воздействует на результаты. При флотации угля смесью реагентов извлечение крупных частиц в концентрат увеличилось на 14%, а зольность в отходах не изменилась. Для мелких частиц извлечение в концентрат и зольность в отходах выросли на 7%. При использовании собирателя ОММ уменьшение размера капель масла приводит к ухудшению показателей флотации крупных и мелких частиц.

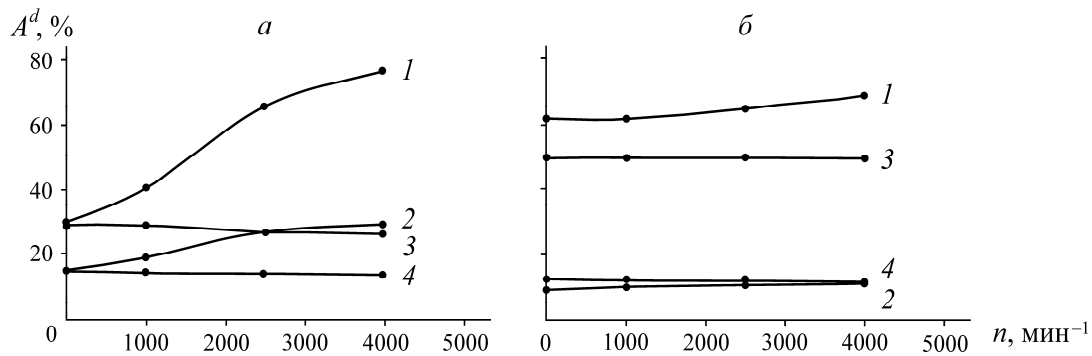


Рис. 5. Влияние скорости перемешивания на зольность отходов при флотации угля марки КС (а) и СС (б) крупностью +0.045 мм (2, 4) и –0.045 мм (1, 3) эмульсией СР (1, 2) и ОММ (3, 4)

Результаты расчета коэффициента селективности флотации крупных и мелких частиц показаны на рис. 6. Отмечается низкая избирательность разделения крупных частиц при флотации углей обеих марок, на угле марки СС коэффициент селективности переходит в отрицательную область: при зольности крупного класса +0.045 мм 12.7% около 80% частиц этого класса имеют крупность 0.045–0.125 мм и зольность 13.9%. Частицы такой крупности эффективно переходят в пенный продукт флотации, а низкзолные более крупные частицы остаются в камерном продукте. Зольность крупного класса в отходах оказывается меньше зольности этого класса в концентрате, коэффициент селективности становится отрицательным.

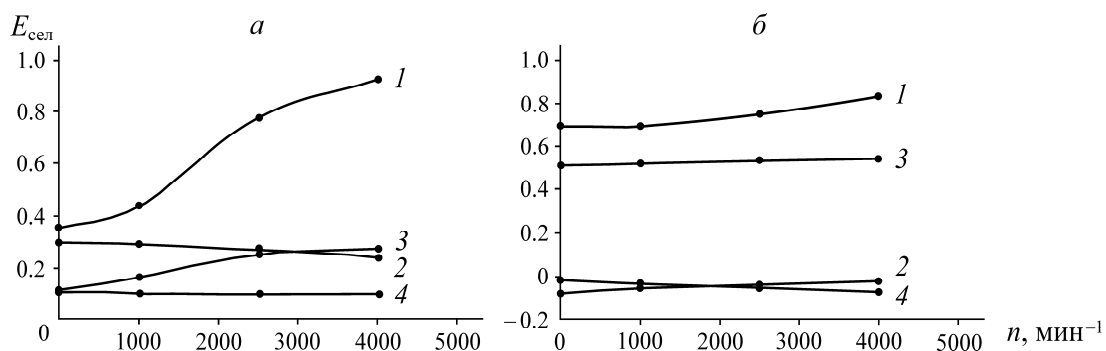


Рис. 6. Влияние скорости перемешивания на коэффициент селективности при флотации угля марки КС (а) и СС (б) крупностью +0.045 мм (2, 4) и –0.045 мм (1, 3) эмульсией СР (1, 2) и ОММ (3, 4)

ВЫВОДЫ

По результатам оценки дисперсности эмульсий на лазерном дифракционном анализаторе Analysette 22 показано перераспределение по классам крупности капель в получаемой эмульсии при разной интенсивности перемешивания, что позволяет подобрать необходимый режим эмульгирования для улучшения показателей флотации шламов. Повышение флотации тонких угольных шламов эмульсией СР объясняется высокой вероятностью закрепления микрокапель реагентов на пузырьках с образованием омасленных пузырьков и налипанием на них мелких частиц угля. Уменьшение размера капель при эмульгировании ОММ отрицательно влияет на результаты флотации углей марок КС и СС из-за плохой смачиваемости вязким маслом угольной поверхности и действия вязких гистерезисных сил, препятствующих перемещению трехфазного периметра смачивания и растеканию мелких капель по поверхности

угля в воде. При определении оптимального дисперсного состава масел необходимо учитывать характеристики применяемого реагента, гранулометрический и вещественный состав угольных шламов, а также условия флотации шламов. Результаты измерений дисперсного состава эмульсий масляных собирателей можно использовать для повышения эффективности флотации угольных шламов на углеобогащительных фабриках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелик-Гайказян В. И., Ворончихина В. В., Плаксин И. Н. О механизме закрепления эмульсированных аполярных реагентов на угольных частицах при флотации // Кокс и химия. — 1967. — № 10. — С. 7–9.
2. Клейн М. С. Очистка шламовых вод углеобогащения с использованием селективной сепарации шламов масляными реагентами // Уголь. — 2005. — № 9. — С. 43–45.
3. Мелик-Гайказян В. И., Байченко А. А., Ворончихина В. В. К эмульсированию масляных флото-реагентов в промышленных условиях и оценке дисперсности получаемой эмульсии // Кокс и химия. — 1964. — № 3. — С. 9–13.
4. Международный стандарт ISO 13320-1. Анализ размеров частиц, методы лазерной дифракции.
5. Шмидт А. А., Ганин П. Г. Вероятность дробления и устойчивости капель в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности и в аппарате с перемешиванием // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2008. — Т. 8. — № 6. — С. 921–930.
6. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. — Л.: Химия, 1984. — 336 с.
7. Клейн М. С. Роль гистерезисных сил при флотации крупных частиц // Энергетические воздействия в процессах переработки минерального сырья: сб. науч. тр. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1987. — С. 133–140.
8. Байченко А. А., Листовничий А. В., Клейн М. С. Гистерезис смачивания и упрочнение контакта между частицей и пузырьком в присутствии аполярного реагента // Коллоид. журн. — 1989. — Т. 1. — С. 127–129.
9. Дерягин Б. В., Духин С. С., Рулев Н. Н. Микрофлотация. Водоочистка, обогащение. — М.: Химия, 1986. — 232 с.
10. Мелик-Гайказян В. И. О механизме действия аполярных реагентов при пенной флотации // Обогащение руд. — 1970. — № 3. — С. 38–43.
11. Кондратьев А. С., Изотов А. С. Влияние аполярных реагентов и поверхностно-активных веществ на устойчивость флотационного комплекса // ФТПРПИ. — 2000. — № 4. — С. 108–116.
12. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: Физматлит, 1959. — 700 с.
13. Духин С. С., Рулев Н. Н., Димитров Д. С. Коагуляция и динамика тонких пленок. — Киев: Наук. думка, 1986. — 232 с.
14. Цветичанин Л., Лазич П., Вучинич Д. Влияние крупности галенита и концентрации собирателя на флотационное извлечение и кинетику флотации // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 143–149.
15. Кондратьев С. А. Метод выбора структуры и состава углеводородного фрагмента молекулы собирателя // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 87–98.

Поступила в редакцию 18/VIII 2020

После доработки 09/IX 2020

Принята к публикации 11/IX 2020