

УДК 622.928

**В.И. КРИВОЩЕКОВ** канд. техн. наук,**И.Н. МАЦЮК**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

**БЕЗРЕАГЕНТНАЯ ФЛОТОСЕПАРАЦИЯ: МЕТОД И УСТРОЙСТВО**

Флотація угольних шламов протікає тільки при використанні реагентів, хоча уголь і являється гідрофобним. Її застосування не тільки як методу збагачення шламов, але й очищення оборотних вод дозволило перевести ряд фабрик на роботу по раціональним замкнутим водно-шламовим схемам. Однак ефективність роботи операцій водно-шламової схеми низька, а процес флотації проводиться частіше не так як це вимагається по технологічному регламенту.

На углеобогатительных фабриках для переработки шламов наибольшее распространение получили механические импеллерные флотомашини, в которых воздух засасывается импеллером вследствие прохождения через него пульпы, а также значительной внутрикамерной циркуляции. Чем больший объем пульпы проходит через импеллер (при прочих равных условиях), тем больший объем воздуха им засасывается (до определенных пределов).

Выброшенная импеллером пульпо-воздушная смесь перемещается снизу вверх в направлении его вращения. Воздушные пузырьки за счет подъемной силы стремятся кратчайшим путем всплыть на поверхность пульпы во флотокамере, но их траектория усложняется с некоторым торможением в турбулентных потоках. Если считать, что минерализация воздушных пузырьков происходит почти мгновенно в зонах выброса пульпо-воздушной смеси из импеллера, то время нахождения комплекса "минерал-пузырек" во флотационной камере должно быть минимальным.

Следовательно, необходимость внутрикамерной циркуляции для эжекции атмосферного воздуха, а также увеличение частоты вращения импеллера с целью достаточного перемешивания пульпы и диспергирования поступающего в камеру флотомашини воздуха находятся в противоречии с потребностью создания спокойной зоны в объеме камеры для эффективного выделения минерализованных воздушных пузырьков.

Для улучшения условий всплывания пузырьков и их концентрации в пенном слое в камерах флотомашин устанавливают успокоительные решетки, перегородки и пр. Однако это не дает желаемого результата и

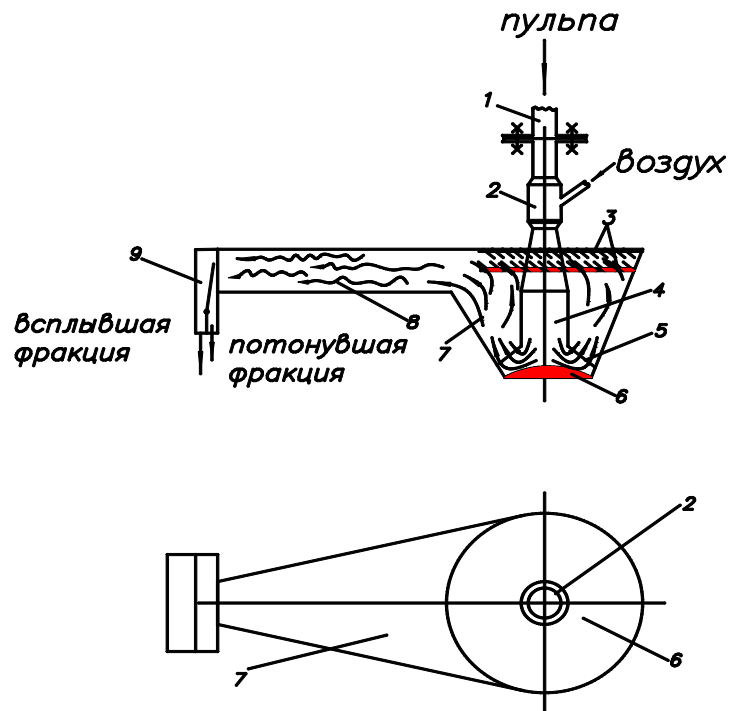
всплывание происходит в неблагоприятных условиях. Поэтому можно считать, что не весь объем флотационной камеры является эффективным, т. е. таким, в котором условия движения пульпы способствуют всплыванию воздушных пузырьков или же не тормозят их.

Анализ движения и распределения пульпо-воздушных потоков в камере машин показывает, что протеканию более эффективной флотации препятствуют неупорядоченные турбулентные потоки пульпы и внутрикамерная циркуляция, ограничивающих скорость всплывания минерализованных воздушных пузырьков в пенный продукт, а также загрузка исходной пульпы и, особенно, разгрузка продуктов обогащения флотационной камеры.

Из показателей работы и теоретического анализа аэрационных параметров следует, что для усовершенствования флотационной машины необходимо рациональное сочетание аэратора и камеры, интенсифицирующих выделение минерализованных воздушных пузырьков.

Опыт эксплуатации эжекторной флотационной машины показывает, что она по сравнению с машинами других типов обладает рядом преимуществ: из-за простоты конструкции ее можно изготавливать в механических мастерских фабрик; небольшая металлоемкость позволяет устанавливать ее на любых перекрытиях здания; компоновка флотационных камер, аэраторов-эжекторов и насосов может быть самой разнообразной, а ремонт машины заключается только в замене турбинки насоса и насадки аэратора-эжектора.

Особенность нового безреагентного флотосепаратора для переработки угольного шлама (рис. 1) состоит в том, что к суживающемуся желобу примыкает флотационная камера с аэратором-эжектором. Шламная вода, поступающая во флотосепаратор, подвергается разделению на две фракции: потонувшую и всплывшую.



1. Трубопровод
2. Аэратор-эжектор
3. Успокоительная решетка
4. Трубопровод пульповоздушной смеси
5. Успокоительная решетка
6. Отбойная плита – распределитель пульповоздушной смеси
7. Флотокамера
8. Суживающийся желоб
9. Приемник продуктов разделения

Рис. 1. Принципиальная схема безреагентного флотосепаратора:

- 1 – трубопровод; 2 – аэратор-эжектор; 3 – успокоительная решетка;  
 4 – трубопровод пульпо-воздушной смеси; 5 – успокоительная решетка;  
 6 – отбойная плита – распределитель пульпо-воздушной смеси; 7 – флотокамера;  
 8 – суживающийся желоб; 9 – приемник продуктов сепарации с шибером

В основу конструкции флотосепаратора положены следующие принципы:

1. Процессы аэрации пульпы, минерализации воздушных пузырьков и выделения последних из пульпы должны протекать при различных гидродинамических режимах, а именно: аэрация пульпы осуществляется перемешиванием пульпо-воздушной смеси при регулируемом количестве засасываемого воздуха; выделение минерализованных воздушных пузырьков протекает в условиях

восходящих потоков пульпы;

2.Аэратор-эжектор должен обеспечивать высокую регулируемую степень аэрации пульпы по количеству засасываемого воздуха, тонкую дисперсность воздушных пузырьков и резкий перепад давления в пульпе для интенсификации процесса минерализации воздушных пузырьков;

3.Во флотационной камере должна отсутствовать внутрикамерная циркуляция потоков пульпы, а пульпо-воздушная смесь перемещаться снизу вверх в направлении всплывания воздушных пузырьков; разгрузка продуктов сепарации – прямоточная.

Принципиальная схема аэратора-эжектора изображена на рис. 2. Аэратор состоит из переходного патрубка 1, насадки 2 (типы насадок аэратора-эжектора представлены на рис. 3.) с внутренним вставным конусом 3, диффузора 4 и воздухозаборных патрубков 5, которые снабжены задвижками для регулирования количества засасываемого аэратором воздуха.

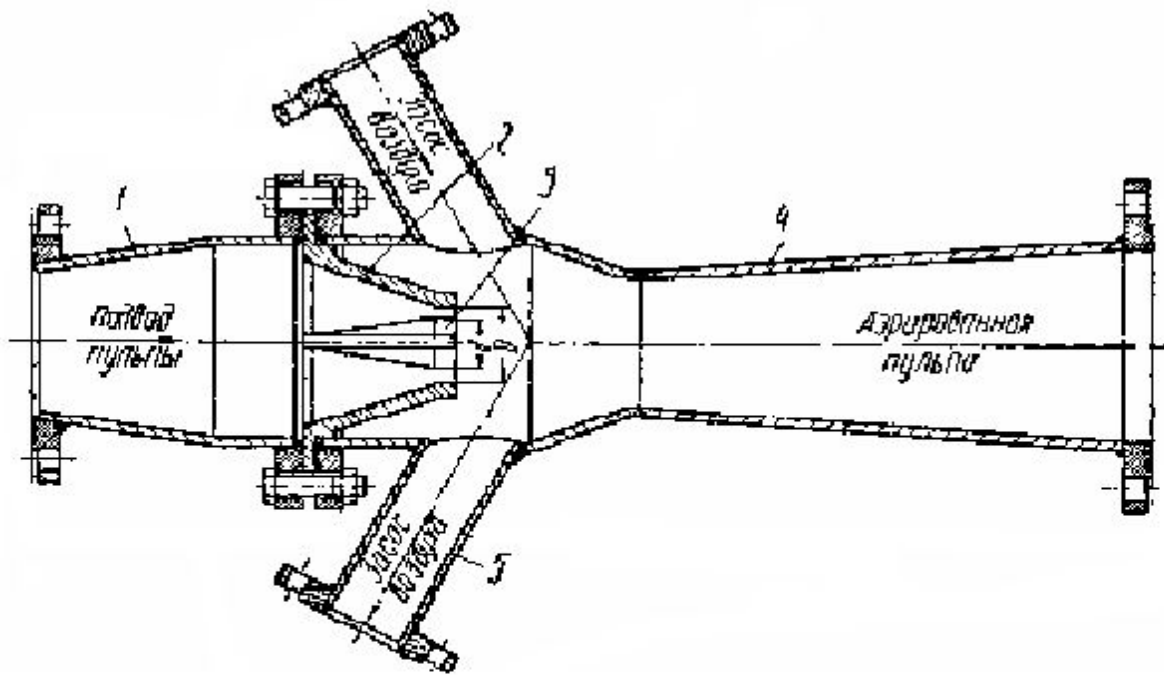


Рис. 2. Принципиальная схема аэратора-эжектора

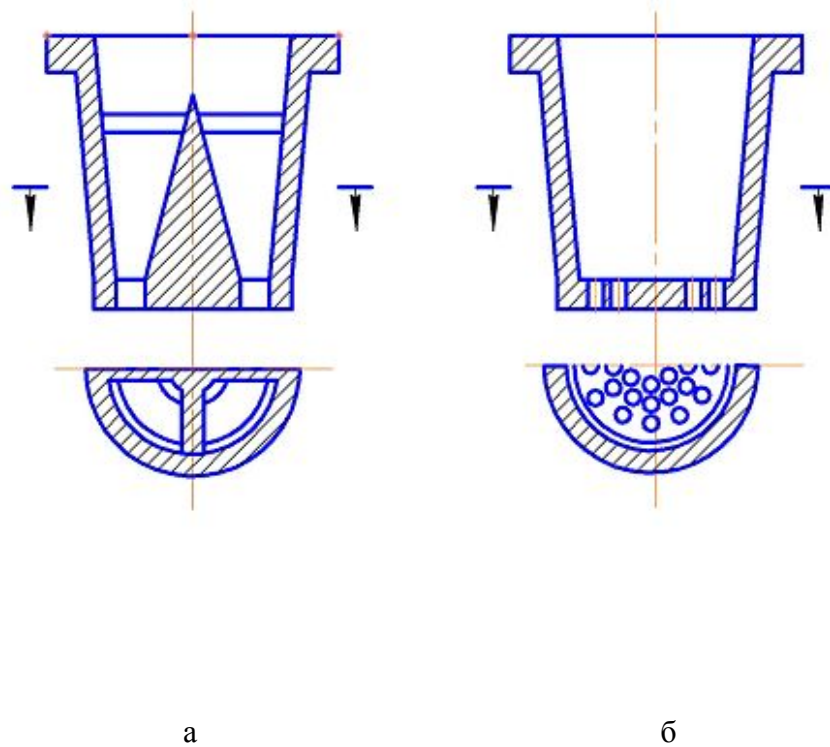


Рис. 3. Типы насадок аэратора-эжектора:  
а – коническая; б – пластинчатая

При разработке конструкции безреагентного флотосепаратора учитывались как специфические особенности флотации, так и те принципы, которым должны удовлетворять флотационные машины [1–3]. Его испытания и технологические исследования безреагентной флотосепарации бурогоугольного шлама позволили сделать следующие выводы:

1. Высокая степень аэрации пульпы в аэраторе-эжекторе и применение флотационной камеры специальной конструкции способствовало увеличению скорости протекания флотации по сравнению с машинами других типов. Время флотосепарации бурогоугольного шлама сокращено, качественно-количественные показатели и эффективность разделения выше по сравнению с флотацией в машине механического типа;

2. Степень аэрации пульпы характеризуется коэффициентом подмешивания (отношение количества засасываемого аэратором воздуха к количеству проходящей через него пульпы), величина которого прямо пропорциональна давлению в камере смешения аэратора и обратно пропорциональна диаметру струи жидкости и давлению пульпо-воздушной смеси на выходе из диффузора аэратора;

3. Значительная скорость (17–20 м/с), с которой пульпа проходит через аэратор-эжектор, обуславливает тонкое диспергирование засасываемого

воздуха и его равномерное распределение в объеме движущейся пульпы;

4. Резкий перепад давления в насадке аэратора-эжектора и в камере смешивания интенсифицирует выделение из жидкости газов, способствующих минерализации воздушных пузырьков;

5. Конструкция флотационной камеры сепаратора позволила устранить внутрикамерные циркуляционные потоки; при этом камера загружается по всему нижнему поперечному сечению, а разгружается – по ее верхнему периметру;

6. При переработке буроугольного шлама в безреагентном флотосепараторе удельная производительность достигает 2,5 т/(ч·м<sup>3</sup>) при удельном расходе электроэнергии 3 кВт·ч/т, в то время как при флотации угольных шламов во флотационных машинах механического типа – 1,15–1,20 т/(ч·м<sup>3</sup>) и 4 кВт·ч/т соответственно.

Фракционный анализ всплывшей фракции (табл. 1) буроугольного шлама проводили по следующей методике. Пробу фракции помещали в воду при t=100 °С, перемешивали, охлаждали, декантировали воду, с которой удалялись и битумные компоненты. Затем пробу высушивали при комнатной температуре и фракционировали в растворе хлористого натрия с содержанием соли 1,5; 2,8; 5,0; 9,0 и 15%. Фракционный анализ потонувшей фракции (табл. 2) проводили в растворе хлористого цинка по стандартной методике.

Таблица 1

| Плотность фракций, кг/м <sup>3</sup> | Выход γ, % | Зольность A <sup>d</sup> , % | γ <sub>i</sub> A <sub>i</sub> <sup>d</sup> | Суммарные показатели, % |                |                 |                |
|--------------------------------------|------------|------------------------------|--|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|
|                                      |            |                              |  | легкая фракция          |                | тяжелая фракция |                |
|                                      |            |                              |  | γ                       | A <sup>d</sup> | γ               | A <sup>d</sup> |
| <1009                                | 5,18       | 11,94                        | 61,85                                      | 5,18                    | 11,94          | 100,0           | 12,67          |
| 1009–1017                            | 17,61      | 12,56                        | 221,18                                     | 22,79                   | 12,42          | 94,82           | 12,71          |
| 1017–1035                            | 72,75      | 12,68                        | 922,47                                     | 95,54                   | 12,62          | 77,21           | 12,75          |
| 1035–1070                            | 2,42       | 12,73                        | 30,81                                      | 97,96                   | 12,62          | 4,46            | 13,85          |
| 1070–1109                            | 1,17       | 14,85                        | 17,37                                      | 99,13                   | 12,65          | 2,04            | 15,17          |
| >1109                                | 0,87       | 15,61                        | 13,58                                      | 100,0                   | 12,67          | 0,87            | 15,61          |
| Итого                                | 100,0      | 12,67                        | 1267,26                                    | –                       | –              | –               | –              |

Таблица 2

| Плотность фракций, кг/м <sup>3</sup> | Выход γ, % | Зольность A <sup>d</sup> , % | γ <sub>i</sub> A <sub>i</sub> <sup>d</sup> | Суммарные показатели, % |                |                 |                |
|--------------------------------------|------------|------------------------------|--|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|
|                                      |            |                              |  | легкая фракция          |                | тяжелая фракция |                |
|                                      |            |                              |  | γ                       | A <sup>d</sup> | γ               | A <sup>d</sup> |
| <1100                                | 0,27       | 12,61                        | 3,40                                       | 0,27                    | 12,61          | 100,0           | 22,18          |
| 1100–1200                            | 1,03       | 14,35                        | 14,78                                      | 1,30                    | 13,98          | 99,73           | 22,21          |
| 1200–1300                            | 15,05      | 16,52                        | 248,63                                     | 16,35                   | 16,32          | 98,70           | 22,29          |
| 1300–1400                            | 72,53      | 23,07                        | 1673,27                                    | 88,88                   | 21,83          | 83,65           | 23,33          |
| 1400–1500                            | 9,58       | 24,45                        | 234,23                                     | 98,46                   | 22,08          | 11,12           | 25,03          |
| 1500–1600                            | 1,04       | 24,83                        | 25,82                                      | 99,50                   | 22,11          | 1,54            | 28,62          |

|       |       |       |         |       |       |      |       |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|------|-------|
| >1600 | 0,50  | 36,52 | 18,26   | 100,0 | 22,18 | 0,50 | 36,52 |
| Итого | 100,0 | 22,18 | 2218,39 | –     | –     | –    | –     |

Суммарные характеристики крупности всплывшей и потонувшей фракций буроугольного шлама приведены на рис. 4.

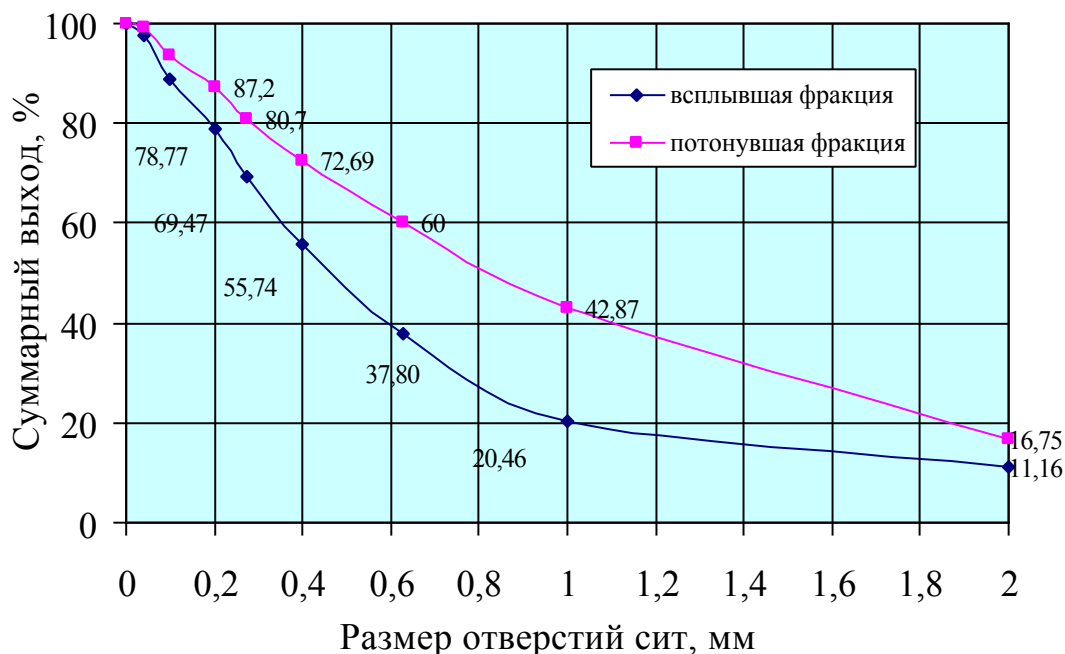


Рис. 4. Суммарная характеристика крупности буроугольного шлама

В настоящее время общепринятых обобщенных критериев оценки разделительной способности зернистых сред, по мнению авторов [4], не существует. Однако существуют понятия, характеризующие ту или иную разделительную способность этих сред применительно к конкретной технологической операции.

Для оценки разделительной способности зернистых сред различных минералов используют их физические, химические и другие свойства. Так на флотируемость угольных шламов оказывают наибольшее влияние их природные свойства: стадии метаморфизма углей, их петрографический и гранулометрический составы, характер вкраплений, состав минеральных примесей и включений, а также окисленность поверхности углей и ее гидрофобность [5].

В качестве критерия оценки разделительной способности безреагентной флотосепарации буроугольного шлама может быть принят комплексный показатель ( $K$ ), учитывающий влияние на процесс: гидрофобности поверхности зерен ( $K_1$ ), фракционного состава всплывшей и потонувшей фракции ( $K_2$ ) и

гранулометрического состава всплывшей и потонувшей фракций ( $K_3$ )

$$K \geq K_1 K_2 K_3 \geq 1,25,$$

где

$$K_1 = \Theta_g / \Theta = 122 / 90 = 1,35;$$

$$K_2 = (\rho_{cв} / \rho_c) (\rho_{сн} / \rho_c) = (1024,94 / 1025) (1345,12 / 1025) = 1,31;$$

$$K_3 = d_{св} / d_{сн} = 0,743 / 1,049 = 0,71;$$

$\Theta_g$  – краевой угол смачивания всплывшей фракции град. [6];  $\Theta$  – краевой угол смачивания, соответствующий точке инверсии ( $\cos \Theta = 0$ ,  $\Theta = 90^\circ$ ) град;  $\rho_{св} =$

$\sum_{i=1}^n \rho_{i(1)} \gamma_{i(1)}$ ,  $\rho_{сн} = \sum_{i=1}^n \rho_{i(2)} \gamma_{i(2)}$  – среднелинейная (средневзвешенная) плотность всплывшей и потонувшей фракций;  $\rho_c = 1025$  кг/м<sup>3</sup> – плотность суспензии (шламовой воды) при плотности шлама 1350 кг/м<sup>3</sup> и концентрации твердого 100 кг/м<sup>3</sup> [7];  $\rho_{i(1)}$ ,  $\rho_{i(2)}$  – среднее значение узкой плотности всплывшей и потонувшей фракций, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{i(1)}$ ,  $\gamma_{i(2)}$  – содержание (выход) всплывшей и потонувшей фракций узких плотностей, доли ед.;  $d_{св}$ ,  $d_{сн}$  – среднелинейная (средневзвешенная) крупность зерен всплывшей и потонувшей фракций, мм;

$d_{св} = \sum_{i=1}^n d_i \gamma_{i(1)} = 0,743$  мм;  $d_{сн} = \sum_{i=1}^n d_i \gamma_{i(2)} = 1,049$  мм (по данным гранулометрического состава);  $d_i$  – средняя крупность классов крупности всплывшей и потонувшей фракций, мм;  $\gamma_{i(1)}$ ,  $\gamma_{i(2)}$  – содержание классов крупности во всплывшей и потонувшей фракциях.

При  $K \geq 1,25$  – безреагентная флотосепарация эффективна; при  $K < 1,25$  – не эффективна.

Качественно-количественные показатели флотосепарации с точки зрения кинетических закономерностей практически определяются коэффициентом скорости флотосепарации ( $K_i$ ) минерала, коэффициентом селективности разделения ( $c$ ), продолжительностью флотосепарации ( $t$ ). Коэффициент  $K_i$  в общем случае зависит от гидроаэрационных параметров флотосепаратора, свойств бурогоугольного шлама.

Если рассматривать закономерность изменения процесса в определенном диапазоне времени (от  $t_1$  до  $t_2$ ), то для данного диапазона условия флотосепарации с достаточной точностью можно принять постоянными (рис. 5), хотя общая кинетическая характеристика процесса от  $t=0$  до  $t \rightarrow \infty$  может изменяться со временем.



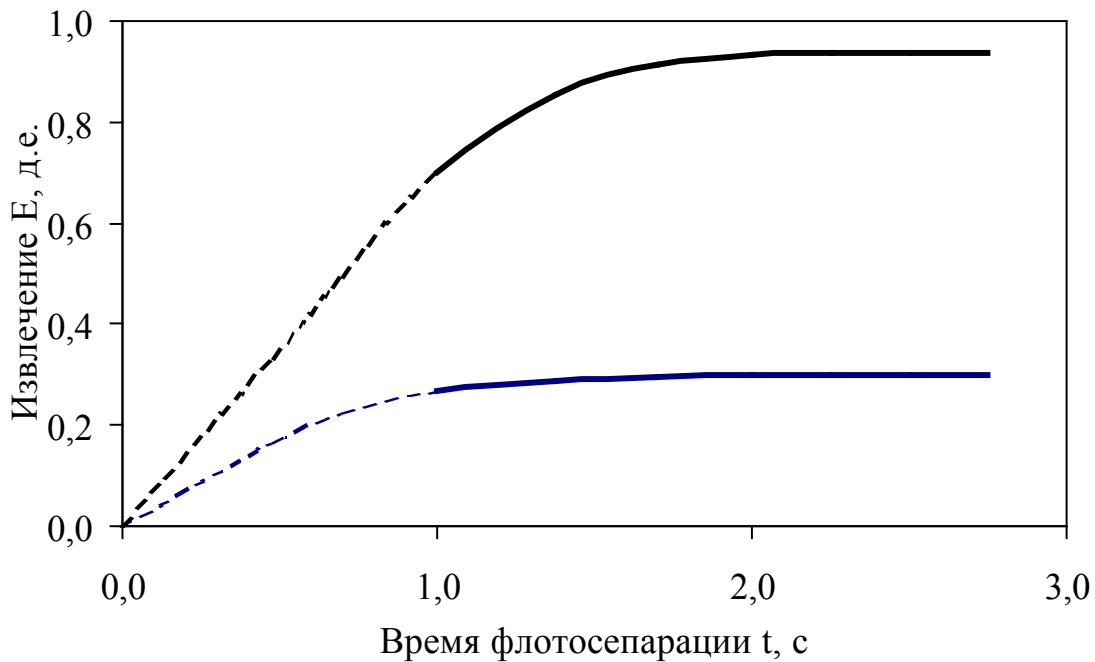


Рис. 5. Кинетика безреагентной флотосепарации

Изменение  $E_i$  в диапазоне времени от  $t_1$  до  $t_2$  можно с достаточной точностью аппроксимировать участком экспоненциальной кривой с  $K_i = \text{const}$  и определить значение  $K_i = \ln(1 - E_i)/t$ . Тогда изменение  $E_i$  в указанном диапазоне времени можно прогнозировать с достаточной точностью по выражению

$$E_e = 1 - e^{-k_e t}; \quad E_n = 1 - e^{-k_n t},$$

где  $E_e$ ,  $E_n$  – частное извлечение всплывшей и потонувшей фракций во всплывший продукт, доли ед.;  $k_e$ ,  $k_n$  – коэффициент скорости флотосепарации всплывшей и потонувшей фракций;  $t$  – время флотосепарации, с.

Состав и качество всплывшего продукта к данному моменту времени определяется извлечением в него как всплывшей так и части потонувшей фракций бурогоугольного шлама.

$$E_e = 1 - e^{-k_e t} = 1 - e^{-1,329 \cdot 2} = 1 - 0,07 = 0,93,$$

$$E_n = 1 - e^{-k_n t} = 1 - e^{-0,164 \cdot 2} = 1 - 0,72 = 0,28.$$

$\eta = E_e - E_n = 0,93 - 0,28 = 0,65$  доли ед.

Коэффициент селективности ( $c$ ) флотосепарации буроугольного шлама (отношение показателей скорости флотосепарации во всплывший продукт всплывшей и потонувшей фракции) составляет

$$c = \ln[1/(1 - E_e)] / \ln[1/(1 - E_n)] = k_e t / (k_n t) = k_e / k_n = 8,1$$

Раздельное кондиционирование исходной пульпы путем гидроциклонирования и обработки реагентами песков гидроциклона с последующим их смешиванием с его сливом [8, 9] позволяет значительно сократить расход реагентов. Поэтому техническая возможность компоновки раздельного кондиционирования и флотосепарации – это перспективное направление развития технологии переработки угольных шламов и других зернистых материалов.

Таким образом, простота изготовления и надежность в эксплуатации, высокие технико-экономические показатели работы будут способствовать применению флотосепаратора не только для переработки буроугольного шлама.

#### Список литературы

1. **Бедрань Н.Г., Жендринский А.П.** Эжекторная флотационная машина. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 76 с.
2. **Бедрань Н.Г.** Обогащение углей: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 206 с.
3. **Бедрань Н.Г.** Флотационные машины для обогащения углей – М.: Недра, 1968. – 210 с.
4. Энергетическая интерпретация гравитационных разделительных процессов зернистых сред при обогащении полезных ископаемых / **А.Д. Полулях, В.И. Чмилев, О.В. Ищенко, Д.А. Полулях.** – Луганск: Изд-во СНУ им. Даля, 2006. – 144с.
5. Справочник по обогащению углей / Под ред. **И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина** – М.: Недра, 1984. – 614 с.
6. **Кривошеков В.И., Мацюк И.Н.** Определение разделительного признака буроугольного шлама брикетной фабрики // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 3 (44). – С. 61–66.
7. Наладка и эксплуатация технологических комплексов углеобогачительных фабрик / **В.И. Хайдакин, В.С. Бутовецкий, М.Н. Ковшарь и др.** – М.: Недра, 1986. – 223с.
8. А.с. 935133 СССР, МКИ ВОЗД 1/14. Устройство для подготовки пульпы к процессу флотации / **Я.С. Гольдберг, В.И. Кривошеков, Л.М. Зинич.** – Опубл. 15.06.82 // Бюл. Открытия. Изобр. № 2, 1982.
9. **Кривошеков В.И., Мацюк И.Н.** Комбинированный способ кондиционирования пульпы // Теория и практика процессов измельчения, смешивания и уплотнения: Материалы IX Междунар. конф. – Одесса: ОГМА, 2002. – С.62–66.

© Кривошеков В.И., Мацюк И.Н., 2006