

УДК 622.765

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ВТОРИЧНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ФЛОТАЦИОННОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕННОМ СЛОЕ

Ледян Ю.П., Щербакова М.К. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*Одним из способов повышения эффективности, качества и снижения энергоёмкости процесса флотации минералов является вторичное обогащение концентрата в пенном слое непосредственно на поверхности пульпы во флотационной камере. В ходе многолетних исследований в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ, г. Минск) разработан способ вторичного обогащения в минерализованном пенном слое, основанный на использовании в качестве промывной жидкости предварительно вспененного оборотного маточного раствора, наносимого в виде пены на поверхность минерализованной пены флотаконцентрата. Разработанный способ увеличивает извлечение и повышает качество концентрата, не требует дополнительных энергетических затрат и дорогостоящего оборудования. Для реализации разработанного способа используется оборотный маточный раствор, обычно подаваемый в пенный желоб флотационной машины для разрушения сливающейся из камеры флотационной пены.*

### Введение

Совершенствование технологического процесса производства калийных удобрений является важнейшей задачей, решение которой позволяет не только увеличить извлечение хлорида калия из сильвинитовой руды, повысить качество флотационного концентрата, снизить энергоёмкость процесса, но и сократить число перечисток, что также является весьма важным положительным фактором в свете решения проблемы снижения энергопотребления и увеличения производительности флотационных машин.

Одним из наиболее перспективных реальных направлений повышения качества флотационного концентрата как на стадии основной флотации, так и на стадиях перечисток является вторичное обогащение сильвина в пенном слое.

### Вторичное обогащение минералов в пенном слое

Вторичное обогащение минералов в пенном слое представляет собой процесс дополнительного обогащения, происходящий в пенном слое флотационных машин, путем избирательного удаления из пены флотационного концентрата частиц пустой породы минералов потоками промывной жидкости, стекающей между минерализованными пузырьками пены. Вторичное обогащение минералов в пенном слое может происходить самопроизвольно (причем из пены выпадают более гидратированные и слабо закреплённые частицы) или путем принудительного орошения пены промывной жидкостью, в качестве которой использовалась вода, подаваемой через специальные брызгалки-души, установленные над камерами флотационных машин [1].

Орошение пены флотоконцентрата непосредственно на поверхности флотационной камеры приводит к снижению расхода реагентов и сокращению числа перечистных операций флотации.

В настоящее время отсутствует единый подход к объяснению процессов, протекающих в пенном слое, но, несмотря на существование множества точек зрения, практически все авторы сходятся в одном мнении – состояние пенного слоя во многом определяет результаты флотационного процесса.

В ходе проведения многолетних исследований по совершенствованию и интенсификации процесса флотации сальвина из сальвинитовой руды в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) совместно с ОАО «Беларуськалий» был разработан новый способ вторичного обогащения флотационного концентрата в поверхностном слое, основанный на применении предварительно вспененного маточного раствора.

Разработанный способ поверхностного обогащения в пенном слое может быть использован совместно с механической или пневматической флотациями как на стадии основной флотации, так и на стадиях дополнительных перерывов.

Сущность разработанного способа поверхностного обогащения в пенном слое заключается в предварительном вспенивании оборотного маточного раствора в разработанном пеногенераторе и последующем нанесении полученной пены равномерным слоем на поверхность минерализованной пены флотационного концентрата непосредственно в камере флотационной машины.

Вспенивание оборотного маточного раствора происходит без использования дополнительных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Процесс осуществляется за счет остаточной реагентности, постоянно содержащейся в оборотном растворе.

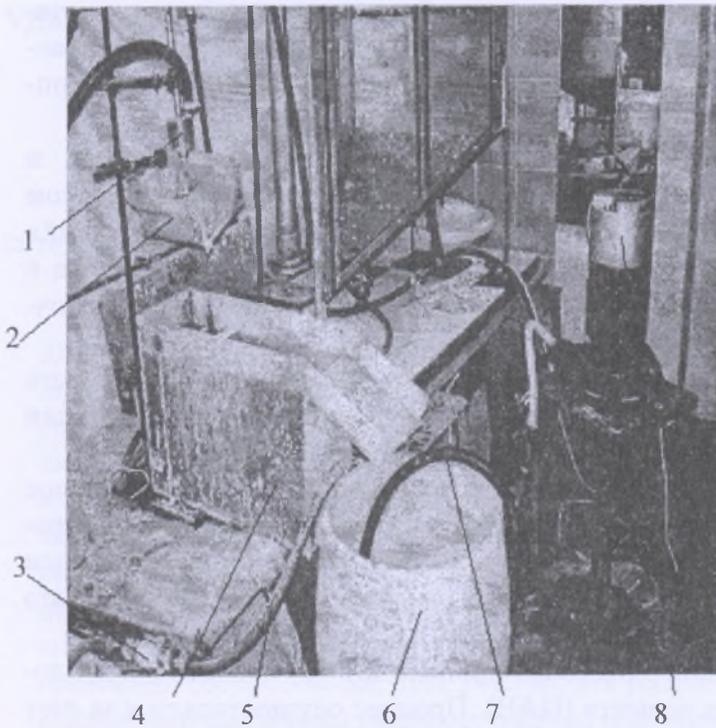
Сложность процесса вторичного обогащения сальвина в пенном слое заключается в том, что осуществить его традиционным способом за счет орошения поверхности минерализованной пены флотационного концентрата каплями воды не представляется возможным. Связано это с тем, что и хлорид калия, и хлорид натрия, являющиеся основными компонентами сальвинитовой руды – водорастворимы.

Использование воды в качестве промывной жидкости приведет к существенному снижению извлечения в результате растворения в ней хлорида калия, что практически исключает возможность использования ее в процессе вторичного обогащения. В качестве орошающей жидкости при флотации сальвина может быть использован только лишь оборотный маточный раствор.

Однако при использовании маточного раствора в качестве промывной жидкости, необходимо решить еще одну достаточно сложную техническую проблему. В случае подачи маточного раствора через отверстия малого диаметра, что необходимо для обеспечения максимально возможной степени диспергирования промывной жидкости [1], они уже через несколько минут после начала эксплуатации полностью выходят из строя, забиваясь кристаллами солей, выпадающих из маточного раствора в результате кристаллизации. Увеличение же диаметра отверстий с целью предотвращения их забивания кристаллами приведет к резкому снижению эффективности диспергирования жидкости на капли, что существенно скажется на качестве и эффективности вторичного обогащения флотационного концентрата.

В оборотном маточном растворе, используемом при флотации, содержится достаточно большое количество остаточных реагентов, благодаря чему он хорошо пенится, создавая достаточно устойчивую пену, которая может быть эффективно использована для вторичного обогащения минерализованной пены флотационного концентрата в поверхностном слое.

Для исследования в лабораторных условиях процесса флотации и промывки минерализованной пены маточным раствором была разработана и изготовлена лабораторная установка, внешний вид которой представлен на рисунке 1.



- 1 – форсунка; 2 – пенообразующая емкость;  
 3 – эжектор; 4 – масштабная модель флотационной  
 камеры; 5 – нагнетательный трубопровод;  
 6 – приемная емкость для маточного раствора;  
 7 – всасывающий трубопровод; 8 – насос

**Рисунок 1 – Лабораторная установка**

На рисунке 2 представлен процесс создания пены маточного раствора в пенообразующей емкости. Образующаяся в емкости 2 пена сливается в масштабную модель флотационной камеры 3 и покрывает поверхность находящегося там флотационного концентрата равномерным слоем. Пузырьки пены через несколько секунд после нанесения ее на поверхность флотационного концентрата разрушаются, образуя мелкодисперсные капельки промывной жидкости, равномерно распределенные по всей поверхности флотационного концентрата.

Задачи и цели эксперимента требовали измерений следующих величин:

$Q_{мр}$  – расход маточного раствора, подаваемого через форсунки;

$Q_{в}$  – расход аэрируемого струей воздуха;

$W_{в}$  – объем воздуха, заключенного в пене;

$W_{п}$  – объем пены.

Расход маточного раствора, сливающегося из пенообразующей емкости, определялся объемным способом [2].

Измерение пенообразующей способности струи маточного раствора в зависимости от способа подачи и параметров струи осуществлялось следующим образом. Под вытекающую из пенообразующей емкости струю пены подставлялась мерная емкость, и одновременно включался секундомер, с помощью которого фиксировалась длительность заполнения мерной емкости пеной. В качестве мерной емкости использовался стеклянный химический мерный цилиндр объемом 250 см<sup>3</sup>. На уровне верхней отметки шкалы цилиндра краской наносилась горизонтальная метка.



1 – форсунка; 2 – пенообразующая емкость;  
3 – масштабная модель флотационной камеры  
**Рисунок 2 – Создание пены маточного раствора в пенообразующей емкости**

После достижения уровнем поверхности пены нанесенной на стенку цилиндра метки цилиндр удалялся из-под струи, а секундомер выключался. В этот момент весь внутренний объем цилиндра был полностью заполнен пеной маточного раствора. Длительность заполнения мерного цилиндра пеной колебалась от 1 до 3 с. После выдержки в течение нескольких десятков секунд пена в мерном цилиндре полностью разрушалась, превращаясь в маточный раствор, в результате чего объем жидкой фазы уменьшался и составлял  $W_2$ . Разница между начальным объемом пены  $W_1$  и конечным объемом маточного раствора  $W_2$  соответствует

объему воздуха, находившегося в исходной пене при атмосферном давлении. Таким образом, объем воздуха, заключенного в пене, определяется выражением:

$$W_b = W_1 - W_2, \quad (1)$$

где  $W_1$  – начальный объем пены,  $\text{см}^3$ ;

$W_2$  – конечный объем маточного раствора,  $\text{см}^3$ .

Расход воздуха и маточного раствора определяется выражением:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \quad (2)$$

где  $W$  – объем воздуха или маточного раствора,  $\text{см}^3$ ;

$\tau$  – длительность заполнения пеной мерного цилиндра или маточным раствором мерной емкости, с.

Анализ работ по теории пенообразования [3] показал, что основными параметрами, характеризующими структуру пены, являются относительный объем жидкости и газа в пене, форма и размер газовых пузырьков, толщина жидких пленок между пузырьками и т.п., обобщающие параметры этой группы свойств – кратность и газосодержание пены.

**Кратность пены** – это отношение объема пены  $W_n$  к объему содержащейся в ней жидкости  $W_{ж}$ :

$$K = \frac{W_n}{W_{ж}} = \frac{W_{ж} + W_b}{W_{ж}} = 1 + \frac{W_b}{W_{ж}}, \quad (3)$$

где  $W_b$  – объем воздуха в пене.

Таким образом, кратность пены характеризуется степень «вспененности» раствора. При описании двухфазных газожидкостных потоков соотношение между объемом газа и жидкости в смеси характеризуют другой величиной – газосодержанием, под которым понимается объемная доля газа в смеси:

$$\varphi = \frac{W_g}{W_g + W_l} = \frac{W_g}{W_{\text{ж}} + W_g}, \quad (4)$$

В качестве основного гидродинамического параметра, позволяющего сравнивать эффективность пенообразования маточного раствора с помощью струй различных диаметров и конфигураций, использовалось число Рейнольдса [4]:

$$Re = \frac{R_r \cdot V}{\nu}, \quad (5)$$

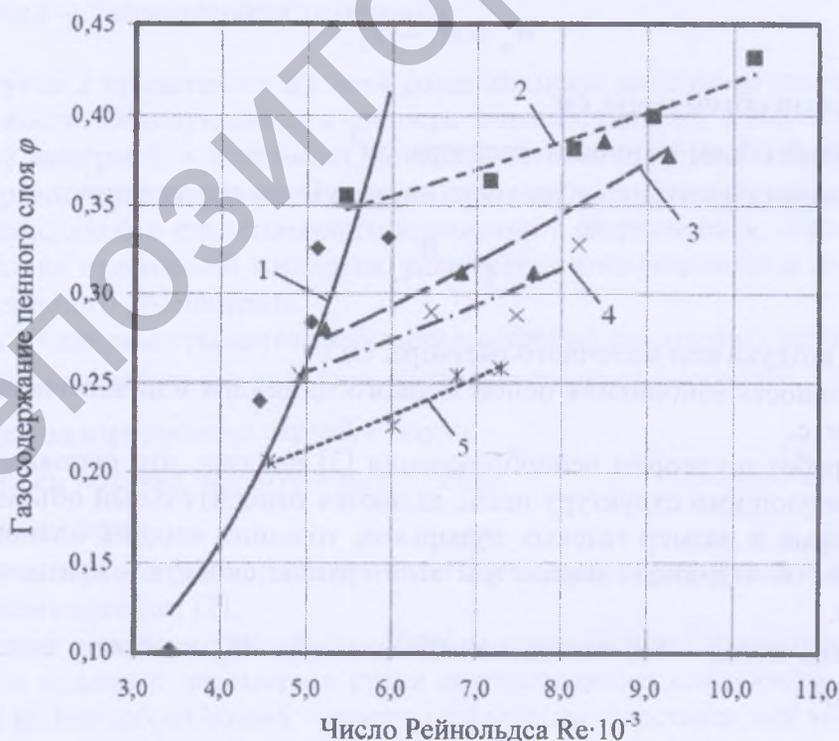
где  $R_r$  – гидравлический радиус струи, см;

$V$  – скорость жидкости на выходе из форсунки, см/с;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, для маточного раствора –  $0,015 \text{ см}^2/\text{с}$ .

В результате проведенных опытов установлена зависимость параметров пены от диаметра и конфигурации сопла, от числа Рейнольдса и от угла  $\alpha$  наклона оси струи к поверхности жидкости в пенообразующей емкости.

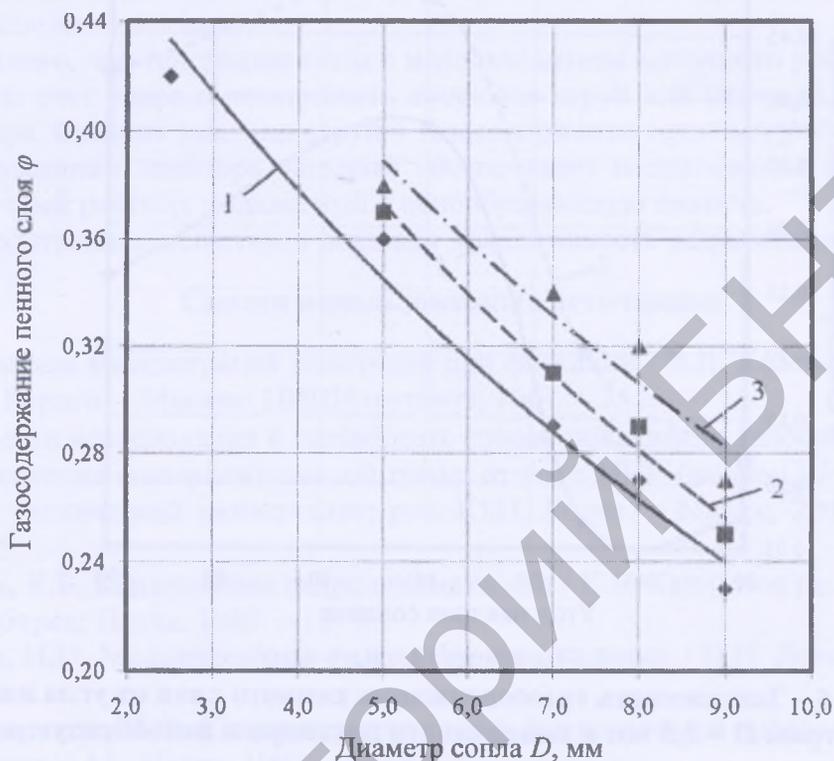
Экспериментальные данные представлены в виде графической зависимости газосодержания  $\varphi$  от числа Рейнольдса для струй круглого сечения, при угле  $\alpha = 90^\circ$  (рисунок 3).



1 –  $D = 2,5$  мм; 2 –  $D = 5$  мм; 3 –  $D = 7$  мм; 4 –  $D = 8$  мм; 5 –  $D = 9$  мм

Рисунок 3 – Зависимость газосодержания пенного слоя от числа Рейнольдса и диаметра для струй круглого сечения,  $\alpha = 90^\circ$

Так, при числе  $Re = 6 \cdot 10^3$  для сопла диаметром  $D = 2,5$  мм  $\varphi = 0,42$ , для  $D = 5$  мм  $\varphi = 0,36$ , для  $D = 7$  мм  $\varphi = 0,28$ , для  $D = 8$  мм  $\varphi = 0,27$ , для  $D = 9$  мм  $\varphi = 0,23$ . В ходе экспериментов установлено, что для струй круглого сечения с диаметром свыше 2,5 мм газосодержание пенного слоя уменьшается с увеличением диаметра (рисунок 4).



1 –  $Re = 6 \cdot 10^3$ ; 2 –  $Re = 7 \cdot 10^3$ ; 3 –  $Re = 8 \cdot 10^3$

**Рисунок 4 – Зависимость газосодержания пенного слоя от диаметра сопла и  $Re$  для струй круглого сечения,  $\alpha = 90^\circ$**

В ходе проведения исследований изучалось влияние угла наклона струй к поверхности маточного раствора на параметры создаваемой пены.

Анализ графических зависимостей подтверждает визуальные наблюдения, что на газонасыщение пенного слоя оказывает влияние угол наклона сопла к поверхности жидкости, что хорошо согласуется с литературными данными [5, 6]. Так, наибольшее значение газосодержания  $\varphi$  наблюдается при угле  $\alpha = 60^\circ$  для сопла  $D = 2,5$  мм (рисунок 5).

В ходе проведения исследований изучалась возможность использования для создания пены форсунки, создающей кольцевую струю. Наружный диаметр струи изменялся от  $D = 5$  мм до  $D = 9$  мм. Внутренний диаметр струи изменялся от  $d = 4$  мм до  $d = 7$  мм. Форсунка располагалась на высоте  $H = 14$  см от поверхности маточного раствора в пенообразующей емкости.

Проведенные эксперименты по определению газонасыщения пенного слоя, показали существенное преимущество струи кольцевого сечения перед сплошной круглой струей при одинаковых площадях сечения и числе Рейнольдса (рисунок 6). Очевидно, это связано с тем, что кольцевая струя обладает большей суммарной поверхностью, что способствует увеличению вносимого в струю объема воздуха при прочих равных условиях.

Проведенные в условиях действующего производства на ОАО «Беларуськалий» промышленные испытания показали, что разработанный способ вторичного обогаще-

ния пенного слоя флотационного концентрата сильвина с использованием предварительно вспененного маточного раствора имеет высокие потенциальные возможности и может быть с успехом использован для флотационного обогащения любых полезных ископаемых в горнорудной промышленности.

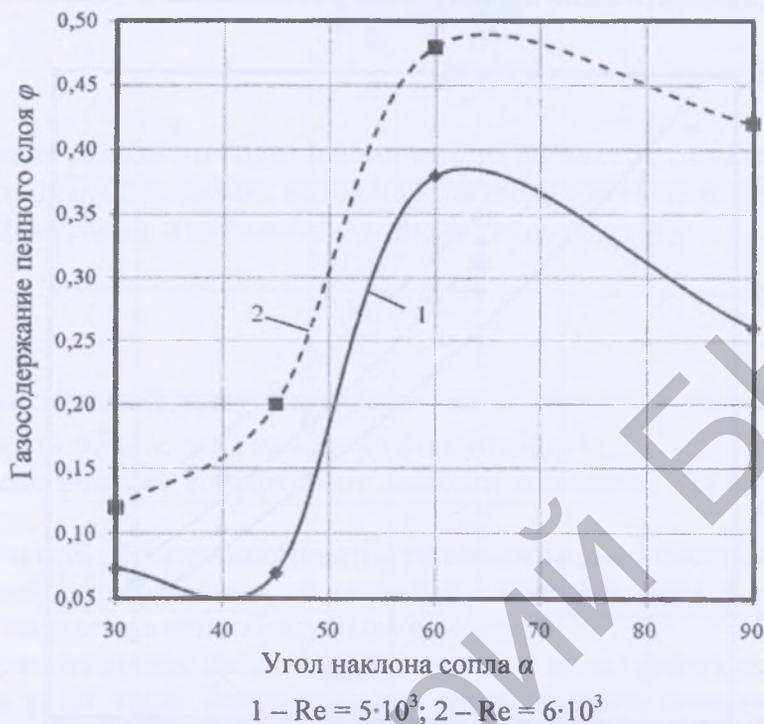
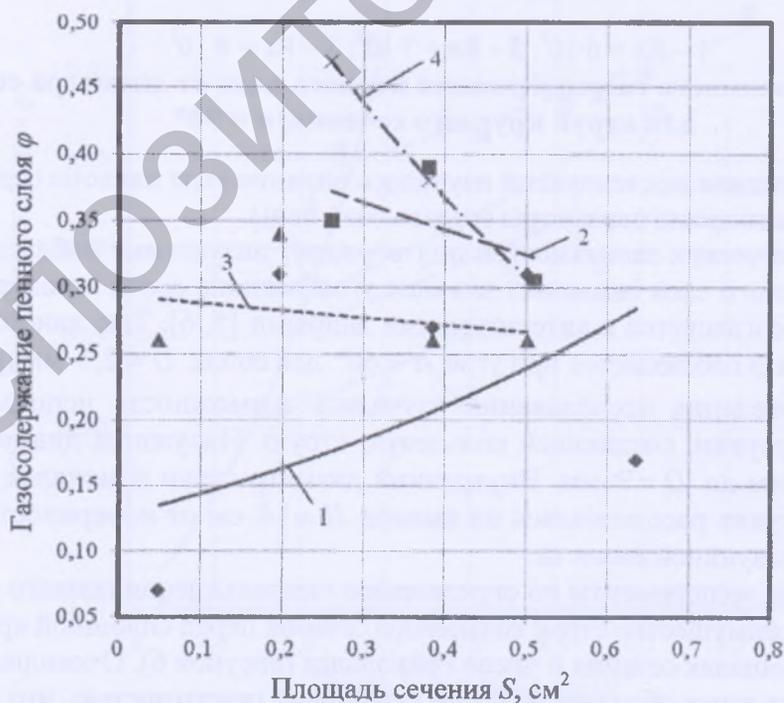


Рисунок 5 – Зависимость газосодержания пенного слоя от угла наклона сопла диаметром  $D = 2,5$  мм к поверхности раствора в пенообразующей емкости



1 – струя круглого сечения,  $\alpha = 45^\circ$ ; 2 – струя кольцевого сечения,  $\alpha = 45^\circ$ ;  
3 – струя круглого сечения,  $\alpha = 90^\circ$ ; 4 – струя кольцевого сечения,  $\alpha = 90^\circ$

Рисунок 6 – Зависимость газосодержания пенного слоя от площади сечения и конфигурации струи,  $Re = 5 \cdot 10^3$

### Выводы

Разработан новый способ вторичного обогащения флотационного концентрата сильвина в пенном слое, заключающийся в предварительном вспенивании маточного раствора, используемого в качестве промывной жидкости, и нанесении образующейся пены равномерным слоем на поверхность флотационного концентрата непосредственно в камере флотационной машины.

Установлено, что генерацию пены с использованием маточного раствора можно осуществлять за счет удара о поверхность жидкости струй или отдельных капель маточного раствора. Степень эжекции струи и газосодержание пены могут быть повышены при использовании эжектора, который обеспечивает подсосывание атмосферного воздуха в маточный раствор, подаваемый в пенообразующую емкость.

Производственные испытания показали эффективность разработанного способа.

### Список использованных источников

1. Вторичная концентрация минералов при флотации / В.И. Классен [и др.]; под общ. ред. Н.К. Вериго. – Москва: ЦИИИцветмета, 1961. – 75 с.
2. Провести исследования и разработать способ повышения качества концентрата методом орошения минерализованной пены: отчет о НИР (заключ.) / Белорусский национальный технический университет; рук. Ю.П. Ледян. – Минск, 2007. – 506 с. – № ГР 20066235.
3. **Канн, К.Б.** Капиллярная гидродинамика пен / К.Б. Канн; под ред. И.Р. Шрейберг. – Новосибирск: Наука, 1989. – 167 с.
4. **Леви, И.И.** Моделирование гидравлических явлений / И.И. Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 236 с.
5. **Мещеряков, Н.Ф.** Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины / Н.Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
6. **Van de Sande, E.** Surface entrainment of air by high velocity water jets / E. Van de Sande, J.M. Smith // Chemical Engineering Science. – 1973. – Vol. 28. – PP. 1161-1168.

**Ledyan Y.P., Shcherbakova M.K.**

### Improvement of the secondary enrichment method of flotation concentrate in a froth bed

*One way to improve efficiency and quality as well as to reduce power consumption of the mineral flotation process is the secondary enrichment of concentrate in a froth bed directly on the pulp's surface in a flotation cell. As a part of the long-term researches at the Belarusian National Technical University (BNTU, Minsk, Republic of Belarus) the method of secondary enrichment in a mineralized froth bed has been developed. It is based on the application of previously foamed reusable mother liquor acting as a washing liquid, which is spread as foam on the surface of the mineral froth of flotation concentrate. The method developed increases the recovery process and the quality of concentrate; it doesn't need any additional energy costs and expensive equipment. To realize the developed method reusable mother liquor is used. It is usually delivered to a froth-overflow launder of a flotation machine to break the flotation froth flowing out of a flotation cell.*

Поступила в редакцию 15.11.2012 г.