

УДК 622.765.063(045)

## К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ СИЛЬВИНА

Лебян Ю.П., Щербакова М.К. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

*Осуществлен анализ основных параметров, определяющих эффективность процесса аэрации жидкости незатопленной свободной струей. Внедрение аэрации в производство представляет большой практический интерес с точки зрения возможности использования положительного эффекта аэрации в различных областях промышленности.*

*Аэрация жидкости незатопленной свободной струей может быть с успехом использована в процессе флотации сильвинитовой руды. Аэрационные показатели этого способа примерно на порядок выше возможностей импеллерной флотации. Дальнейшее расширение применения способа аэрации поверхностными струями позволит в значительной мере снизить энергозатраты и существенно интенсифицировать процесс флотации.*

### Введение

В различных областях современных технологий в последние годы все более широкое применение находит струйная аэрация, осуществляемая путем захвата и подачи воздуха в объем жидкости незатопленной свободной струей.

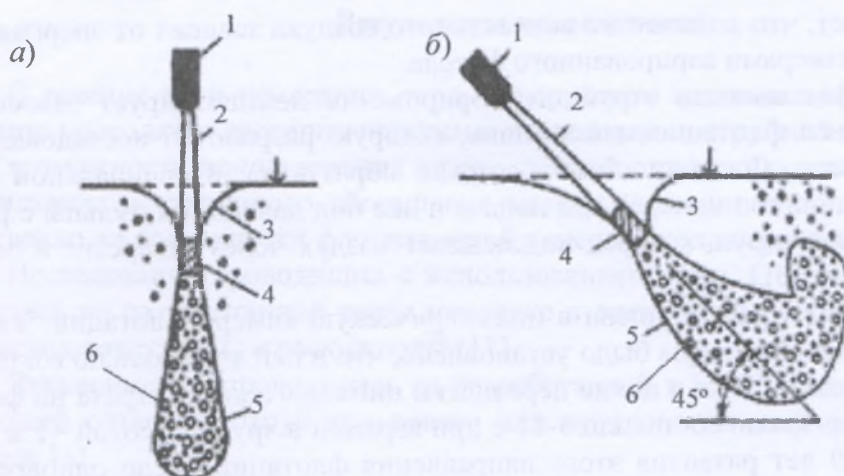
Флотационное обогащение, заключающееся в разделении компонентов измельченной руды с различной смачиваемостью поверхности твердых частиц жидкостью, широко применяемое в горнодобывающей промышленности, является основным технологическим процессом, который используется в ОАО «Беларуськалий» для извлечения хлорида калия (сильвина) из сильвинитовой руды. Технологические показатели флотационного процесса в основном определяются применяемым способом аэрации пульпы.

Разнообразие способов аэрации жидкости и устройств для их осуществления требует не только классификации, что делалось многими авторами в различной интерпретации [1], но и фундаментального подхода для выявления физических закономерностей осуществления процесса аэрации и создания более совершенных устройств и способов для ее реализации.

Для удобства исследования струйную аэрацию было предложено классифицировать следующим образом: вертикальные круглые струи, наклонные круглые струи и глубинное аэрирование [2].

Под струйной аэрацией будем понимать аэрацию жидкости, осуществляемую при проникновении через ее свободную поверхность незатопленной свободной струи той же жидкости, что и аэрируемая [3]. Причем наибольший интерес представляет аэрация при истечении незатопленной струи под давлением из цилиндрического насадка, как наиболее простого с точки зрения сложности изготовления.

Принцип работы струйных аэраторов заключается в подаче жидкости в виде струй и капель через воздушную среду, из которой струя жидкости увлекает с собой газовую фазу, захватывая ее своей поверхностью (рисунок 1). При ударе струи о поверхность жидкости образуется воронка, которая является также источником аэрации поверхностного слоя жидкости.



*а* – вертикальная струя; *б* – наклонная струя  
 1 – насадок; 2 – струя; 3 – воронка; 4 – цилиндрическая переходная зона; 5 – факел;  
 6 – пузырек аэрированного воздуха

**Рисунок 1 – Схема аэрации жидкости незатопленными струями**

Наибольшей эжектирующей способностью обладают турбулентные струи ( $Re > 2300$ ), имеющие на своей поверхности завихрения, дополнительно захватывающие воздух, т.е. поверхность захвата получается более сложной и соответственно более развитой в отличие от поверхности простой цилиндрической (ламинарной) струи.

Н.Ф. Мещеряковым с сотрудниками изучалась аэрация жидкости поверхностными струями с целью использования ее в процессе обогащения. Было установлено, что применение этого способа аэрации весьма перспективно. При аэрации пульпы механическими импеллерами во флотационных машинах степень аэрации составляет  $1 \text{ м}^3$  воздуха на  $1 \text{ м}^3$  аэрируемой пульпы, а при использовании поверхностной аэрации струями  $1 \text{ м}^3$  жидкости может диспергировать до  $10 \text{ м}^3$  воздуха, т.е. аэрирующая способность поверхностных струй практически в десять раз выше [4].

Следует отличать струйную аэрацию жидкости незатопленной свободной струей от аэрации с помощью струйных аппаратов типа эжекторов, обладающей своими специфическими особенностями. Эти два процесса существенно отличаются друг от друга. Аэрация с использованием эжекторов является значительно более энергоемким процессом, чем струйная аэрация [5].

В одной из первых работ, посвященных струйной аэрации, авторами [6] обстоятельно исследовался процесс аэрации жидкости пузырьками газа при помощи вертикальной свободной струи.

В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований процесса аэрации «покоящейся» жидкости (воды). Авторы попытались выяснить влияние физических свойств жидкости, а также некоторых параметров вертикальной незатопленной струи на характеристики факела пузырьков, в частности, на величину содержащегося в нем объема воздуха и размеры пузырьков, насыщающих факел.

Опыты показали, что величина объема воздуха в факеле пузырьков зависит при прочих равных условиях от длины струи и имеет максимум (при «оптимальной» длине).

В технической литературе имеется достаточно много информации о применении струйной аэрации в процессе флотации. В работе [8] представлены результаты испытания устройства для растворения воздуха в воде, предназначенной для флотации. Это устройство позволяет создать развитую и подвижную поверхность соприкосновения фаз («пену») при помощи незатопленных свободных струй воды.

Автор отмечает, что количество вовлекаемого воздуха зависит от энергии струи и характеризуется размерами аэрированного факела.

Высокую эффективность струйного аэрирования демонстрирует завоевавшая популярность колонная флотационная машина, которую разработал исследователь из Австралии G.J. Jameson. Флотационные пузырьки образуются в специальной вертикальной трубе (аэрационной камере) при подаче в нее под давлением пульпы с реагентами в виде свободной струи, которая подсасывает воздух через отверстие в боковой стенке трубы (рисунок 2б).

Нижним концом труба опущена в цилиндрическую камеру флотации. Уже при первых испытаниях такой камеры было установлено, что в ней значительно сокращается длительность флотации. Так в цикле перераспределения цинкового концентрата на фабрике Маунт Айза (Австралия) оно составило 3-11 с при аэрации в трубе высотой ~1 м и диаметром ~0,1 м. За 20 лет развития этого направления флотации число одновременно используемых аэрационных узлов в одной камере флотации возросло уже до 16. Аппараты такого типа наиболее эффективно применяют при обогащении угля и минералов малой плотности, а также используют при флотации руд цветных металлов [9].

Аналогичный способ гидравлического аэрирования в реакторе с вертикальной трубой и последующей флотации в отдельной камере разработан в Московском государственном институте стали и сплавов [10].

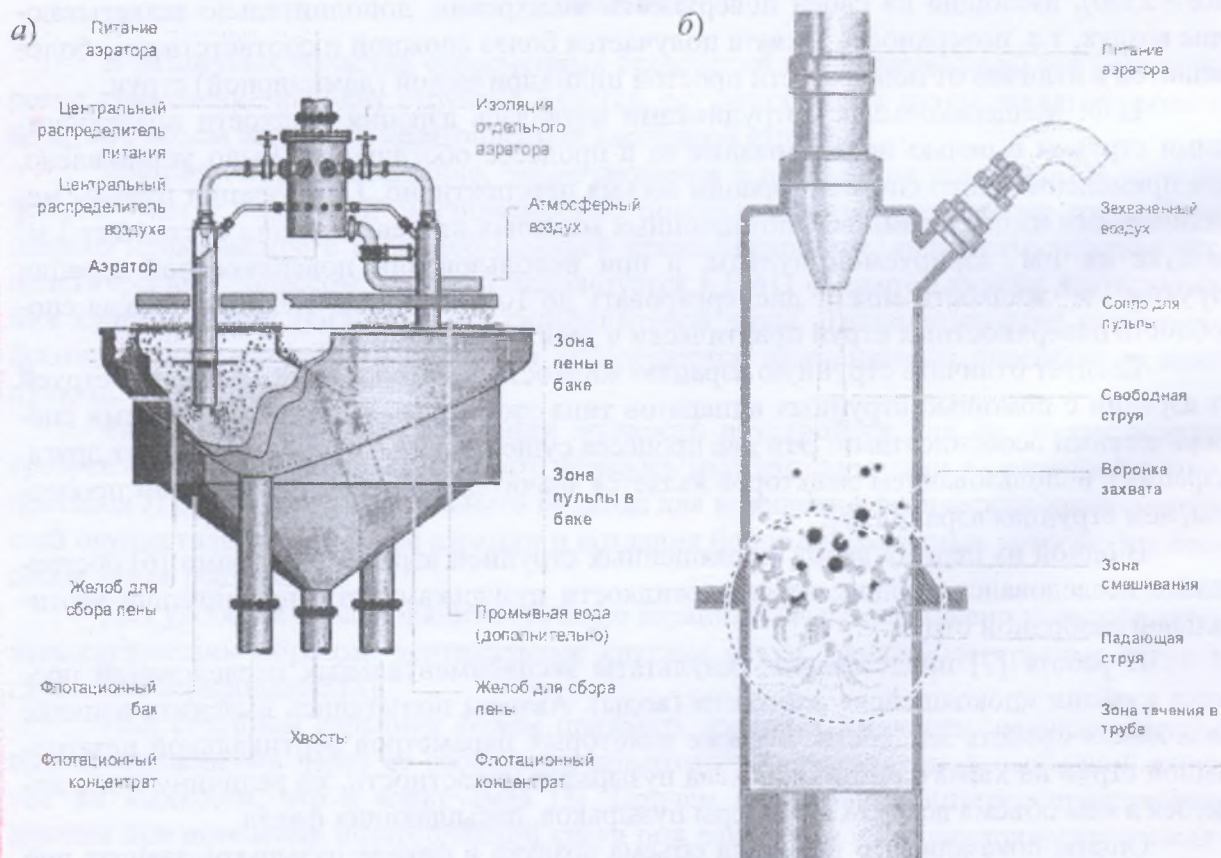


Рисунок 2 – Общий вид колонной флотомашины Джеймсона (а) и ее аэрационной камеры (б)

### Результаты исследований

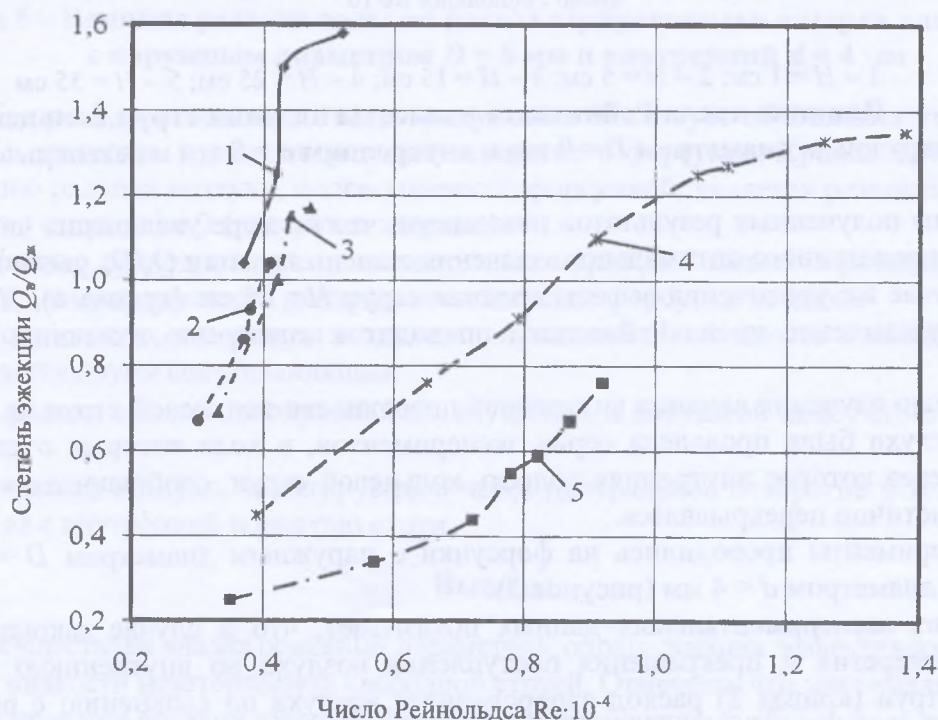
В течение пяти последних лет в Белорусском национальном техническом университете проводятся экспериментальные исследования струйной аэрации с целью изучения возможности использования незатопленной струи жидкости в процессах флотации сильвина и вторичного обогащения минерализованного пенного продукта непосредственно на поверхности флотационной камеры в ходе первичного обогащения.

Исследования проводились с использованием воды. Степень эжекции струи определялась по разработанной ранее методике и оценивалась соотношением  $Q_v/Q_{ж}$ , где  $Q_v$  – расход воздуха,  $Q_{ж}$  – расход воды [11].

Эксперименты проводились на разработанной в БНТУ кольцевой форсунке, позволяющей создавать струи кольцевого или круглого сечений различных диаметров (рисунок 1а).

В ходе проведенных экспериментов исследована зависимость степени эжекции от диаметра сопла. Экспериментальные данные представлены в виде графической зависимости степени эжекции  $Q_v/Q_{ж}$  от числа Рейнольдса для сопел различной конфигурации.

Установлено, что степени эжекции для струй кольцевого сечения выше, чем для струи круглого сечения диаметром  $D = 5$  мм (рисунок 3, кривая 4). Еще более низкой является величина степени эжекции для струи круглого сечения с диаметром  $D = 7$  мм (рисунок 3, кривая 5). Так при числе Рейнольдса  $Re = 4000$  степень эжекции  $Q_v/Q_{ж}$  для струи круглого сечения диаметром  $D = 7$  мм составляет 0,25, а для кольцевой струи с наружным диаметром  $D = 5$  мм и внутренним диаметром  $d = 4$  степень эжекции составляет 1,15, т.е. выше в 4,6 раза.

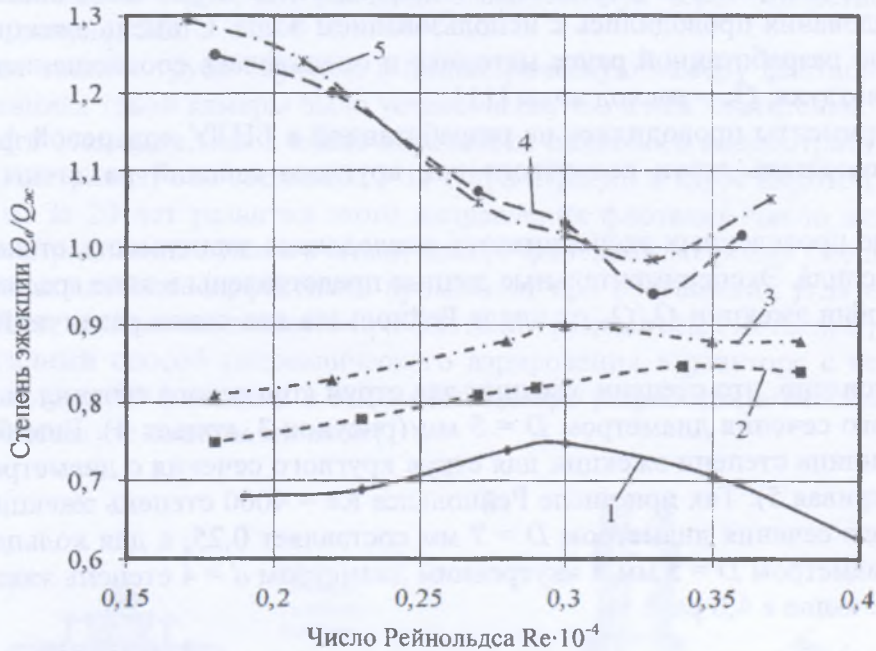


1 – кольцевое сечение, наружный диаметр  $D = 5$  мм; 2 – кольцевое сечение, наружный диаметр  $D = 8$  мм; 3 – кольцевое сечение, наружный диаметр  $D = 9$  мм;  
4 – круглое сечение  $D = 5$  мм; 5 – круглое сечение  $D = 7$  мм

**Рисунок 3 – Влияние числа Рейнольдса на степень эжекции для струи с внутренним диаметром  $d = 4$  мм**

Вторым весьма важным фактором, оказывающим влияние на степень аэрации струей воздуха, является высота падения струи.

Изучение зависимости степени эжекции от числа Рейнольдса и высоты падения для кольцевой струи с наружным диаметром  $D=9$  мм и внутренним диаметром  $d=8$  мм осуществлялось при изменении высоты падения струи от  $H=1$  см до  $H=35$  см (рисунок 4, кривые 1-5).



1 –  $H=1$  см; 2 –  $H=5$  см; 3 –  $H=15$  см; 4 –  $H=25$  см; 5 –  $H=35$  см

**Рисунок 4 – Влияние числа Рейнольдса и высоты падения струи кольцевого сечения с наружным диаметром  $D=9$  мм и внутренним  $d=8$  мм на степень эжекции**

Анализ полученных результатов показывает, что по мере увеличения числа Рейнольдса до определенного оптимального значения степень эжекции  $Q_{в}/Q_{ж}$  увеличивается.

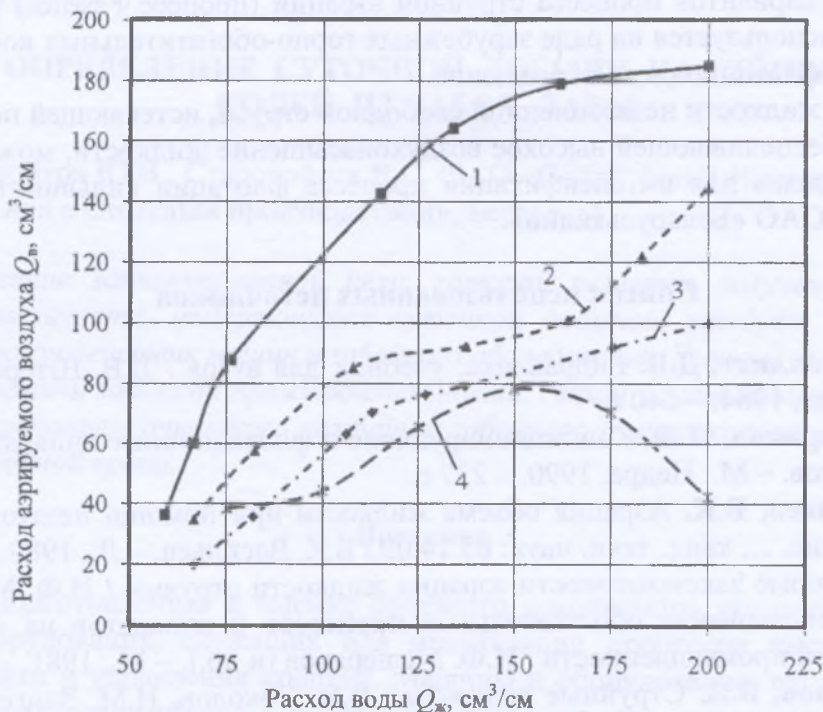
В случае же увеличения высоты падения струи  $H=25$  см (кривая 4),  $H=35$  см (кривая 5) увеличение числа Рейнольдса приводит к снижению величины степени эжекции.

С целью изучения влияния внутренней поверхности кольцевой струи на степень эжекции воздуха была проведена серия экспериментов, в ходе которых отверстие в форсунке, через которое внутренняя полость кольцевой струи, сообщающаяся с атмосферой, герметично перекрывалась.

Эксперименты проводились на форсунки с наружным диаметром  $D=8$  мм и внутренним диаметром  $d=4$  мм (рисунок 5).

Анализ экспериментальных данных показывает, что в случае закрытия центрального отверстия и прекращения поступления воздуха во внутреннюю полость кольцевой струи (кривая 2) расход аэрированного воздуха по сравнению с расходом при открытом отверстии (кривая 3) резко падает.

В тоже время при подаче затопленной струи в жидкость единственный возможный источник поступления воздуха для аэрирования является центральное отверстие в форсунке.



- 1 – высота падения струи 2 см, отверстие открыто;  
 2 – высота падения струи 2 см, отверстие закрыто;  
 3 – входное отверстие касается поверхности воды, струя затоплена;  
 4 – расход воздуха, подсасываемого форсункой

**Рисунок 5 – Влияние расхода воды на расход аэрированного воздуха для форсунки с наружным диаметром  $D = 8$  мм и внутренней  $d = 4$  мм**

Кривая 3, соответствующая этому опыту, свидетельствует об эжекции атмосферного воздуха в жидкость через центральное отверстие в форсунке. Кривая 4, соответствующая изменению расхода воздуха, подсасываемого форсункой, является разностью кривых 1 (отверстие открыто) и 2 (отверстие закрыто).

Именно расход воздуха в соответствии с кривой 4 является расходом подсасываемого из атмосферы через центральное отверстие форсунки воздуха.

Установлено, что расход воздуха, поступающего в жидкость с кольцевой струей определяется двумя составляющими:

- расход воздуха, аэрированного внутренне и наружной поверхностями кольцевой струи;
- расход воздуха, эжектируемого через центральное отверстие форсунки, сообщаемое с внутренней полостью струи.

### Выводы

Осуществлен анализ основных параметров, определяющих эффективность процесса аэрации жидкости незатопленной свободной струей. Отмечено, что максимальную эффективность процесса струйной аэрации обеспечивает применение турбулентных струй.

Объем аэрированного воздуха при использовании струйной аэрации примерно на порядок выше, чем при импеллерной флотации.

Процесс струйной аэрации сопровождается высокой турбулентностью жидкости и интенсивным массообменом, что позволяет резко снизить энергозатраты, связанные с флотацией.

Один из вариантов процесса струйной аэрации (процесс Fastflot) уже более 20 лет с успехом используется на ряде зарубежных горно-обогатительных комбинатов для осуществления флотационного обогащения.

Аэрация жидкости незатопленной свободной струей, истекающей под давлением из насадка и обеспечивающей высокое воздухомышение жидкости, может быть с успехом использована для интенсификации процесса флотации сylvинитовой руды в условиях СОФ ОАО «Беларуськалий».

#### Список использованных источников

1. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник для вузов / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
2. Мещеряков, Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины / Н.Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
3. Васильев, Б.К. Аэрация объема жидкости при помощи незатопленной свободной струи: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.09 / Б.К. Васильев. – Л., 1980. – 230 л.
4. Некоторые закономерности аэрации жидкости струями / Н.Ф. Мещеряков [и др.] // Совершенствование обогатительных процессов и аппаратов на предприятиях горнохимической промышленности / Н.Ф. Мещеряков [и др.]. – М., 1981. – С. 5-11.
5. Соколов, В.Я. Струйные аппараты / В.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1970. – 287 с.
6. Lin, T.J. Gas bubble entrainment by plunging laminar liquid jets / T.J. Lin, H.G. Donnelly // AI. Ch. E. Journal. – 1966. – Vol. 12, № 3. – P. 563-571.
7. Elaawy, E.M. Study of self derated flow with regard to modeling criteria / E.M. Elaawy, E.J. McKeogh // LAHR Congress, Proc. Baden-Baden. – 1977. – Vol. 1. – P. 475-482.
8. Стаханов, Е.А. К расчету резервуара со струйной аэрацией / Е.А. Стаханов // Изв. Высш. Уч. Завед. Строительство и архитектура. – 1975. – № 12. – С. 132-135.
9. Лавриненко, А.А. Современные флотационные машины для минерального сырья / А.А. Лавриненко // Горная техника. – 2008. – № 4. – С. 186-195.
10. Пневматическая флотационная машина: пат. 2275968 РФ, МПК В 03 D 1/24 / Ю.С. Карабасов, В.Д. Самыгин, В.В. Панин, Л.О. Филиппов, Л.Н. Крылов, Д.Ю. Воронин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт стали и сплавов». – № 2004135509; заявл. 06.12.04; опубл. 10.05.06 // Открытия. Изобрет. – 2006. – № 13.

Ledyan Y.P., Shcherbakova M.K.

#### To the question on the use of nonflooded liquid streams in sylvite flotation process

*The analysis of the key parameters determining the efficiency of liquid process aeration by nonflooded free streams has been carried out. Industrial introduction of liquid aeration is of great interest from the point of view of practical application of its beneficial effect in various fields of industry.*

*Liquid aeration by nonflooded free streams can be used successfully in the process of sylvinitic ore flotation. The aeration rates are approximately 10 times higher than those of impeller flotation. Further expansion of the method under consideration will allow to reduce energy consumption as well as to improve the process of flotation.*

Поступила в редакцию 19.10.2011 г.