

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.234.42: 622.235.2

### СОТРЯСАТЕЛЬНОЕ ВЗРЫВАНИЕ ШТАБЕЛЯ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМЫХ РУД ЗАРЯДАМИ НИЗКОПЛОТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

**А. Б. Бегалинов, Е. Т. Сердалиев,  
Е. Е. Искаков, Д. Б. Аманжолов**

*Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева,  
E-mail: www.kazntu.kz,  
ул. К. Сатпаева, 22а, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан*

Дано новое решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности технологии кучного выщелачивания труднообогатимых окисленных и смешанных золотосодержащих руд. В процессе исследования определены оптимальные способы улучшения технологических процессов выщелачивания путем регулярного встряхивания и рыхления штабеля руды взрывными зарядами низкоплотных взрывчатых веществ.

*Кучное выщелачивание, низкоплотные взрывчатые вещества, пенополистирол, встряхивание, проницаемость, кольматация*

Эффективность выщелачивания руды существенно зависит от условия доступа реагента и окислителя, а также от контакта растворителя с минералами внутри рудной массы. Большое значение имеют способ и режим орошения, концентрация и вид реагента, скорость и равномерность просачивания раствора, а также возможность управления в процессе выщелачивания коэффициентами фильтрации и разрыхления горной массы.

Анализ практических данных и результаты опытно-промышленных исследований по выщелачиванию показывают, что основными препятствиями на пути развития метода кучного выщелачивания являются: низкая скорость растворения, обусловленная нахождением металлов в труднорастворимых соединениях; снижение концентрации кислорода в растворе; кольматация, заполнение поровых каналов и пустот рудной массы; выщелачивание руд некондиционных кусков.

Для кучного выщелачивания руд характерна относительно высокая продолжительность технологического процесса, обусловленная медленным проникновением раствора в рудный кусок и горную массу из-за постепенного заиливания. В целях улучшения фильтрации рудной массы предложен эффективный способ, позволяющий многократно и экономично проводить ее рыхление с помощью воздействия взрывов низкоплотных ВВ (джезполитов) с управляемыми взрывчатыми характеристиками.

Технологическая схема кучного выщелачивания золотосодержащих руд по комплексному использованию окисленных и сульфидных руд включает следующие операции (рис. 1): 1) дробление руды; 2) формирование штабеля; 3) выщелачивание рудной массы цианистым раствором; 4) зарядка и периодические взрывы ВВ с управляемой энергией; 5) сбор продуктивного раствора в пруд с гидронепроницаемым основанием; 6) перекачка продуктивных растворов в комплекс обогащения; 7) получение сплава золота до 95–98 %.

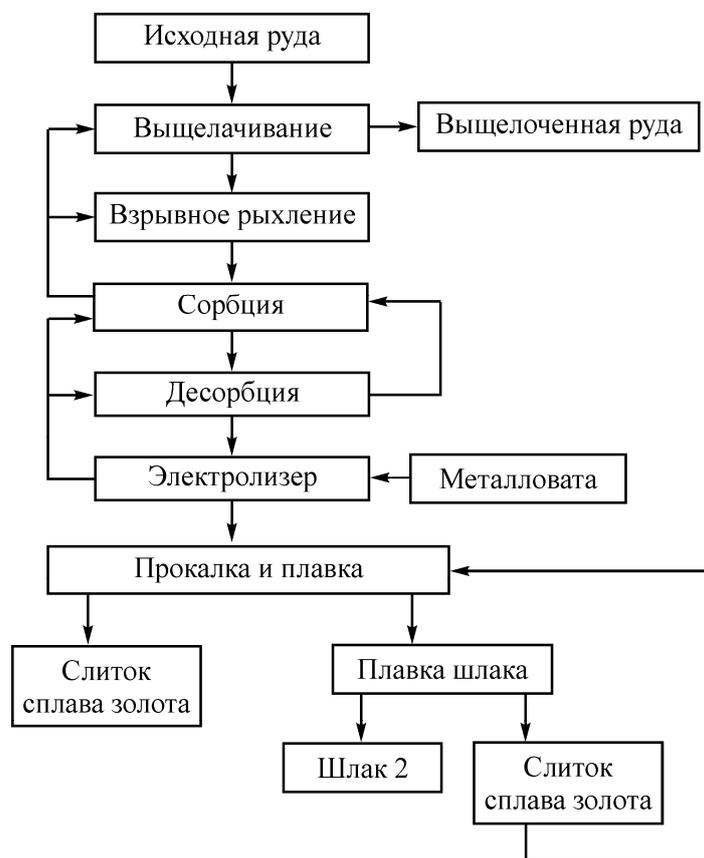


Рис. 1. Технологическая схема кучного выщелачивания с применением взрывного рыхления

Сырьем для переработки кучного выщелачивания служили руды месторождения “Жерек” Восточно-Казахстанской области, которые имеют следующий состав, %: гидрослюда 30–40, кварц 30–40, полевой шпат, превращенный в каолин, 20–30, кальцит 2–5, гетит 5–10. В руде присутствует 0.015 % меди и 0.36 % мышьяка. Скорость фильтрации 0.06–0.08 м/сут.

Золото в рудах свободное самородное, но очень мелкое, преимущественно тонкопластинчатое, игольчатое. Большая часть имеет размер 0.05×0.05 мм, 0.1×0.075, 0.025×0.02, 0.5×0.25 и даже 0.8×0.7 мм, среднее содержание глинистой фракции 0.2 мм до 30 %. Среднее содержание золота в руде 1.75–2.44 г/т.

Характеристика данных руд — вкрапленность минералов, способность к декрипитации и шламообразованию при обработке кислотами. Высокая кислотопоглощающая способность определила основной способ при разработке технологии — выщелачивание в малых кучах высотой не более 3 м с воздействием на кучу сотрясательным взрывом низкоплотных ВВ на основе пенополистирола. Такая технология в отличие от общеизвестного кучного выщелачивания позволяет за короткий срок достигнуть высокого уровня извлечения полезных компонентов при сравнительно низком расходе кислоты [1, 2].

Для кучного выщелачивания рудной массы на подготовленном участке формируется гидронепроницаемое основание. Основание штабеля составляет слой из уплотненной глины, полиэтиленовой пленки толщиной 0.8–1.0 мм, защитный слой песка и дренажный слой, выполненный из крупнокусковой руды (100 мм). Высота отсыпаемого штабеля 3 м, угол бортов штабеля к горизонту не более 43°.

Формирование кучи производится по крупности фракции пород. Крупные фракции располагаются в основании, сверху укладываются фракции по степени их уменьшения. Параметры кучи составляет 80×55×3 м (по нижней части кучи). При формировании кучи на расстоянии 8 м друг от друга устанавливаются перфорированные полиэтиленовые трубы (рис. 2) диаметром 150 мм одноразового использования для заряжания низкоплотными ВВ. Длина труб должна быть больше на 300 мм высоты кучи.

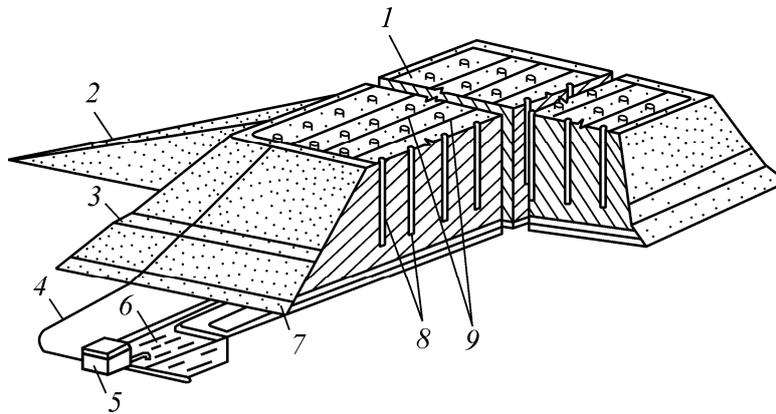


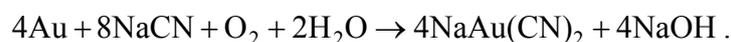
Рис. 2. Штабель кучного выщелачивания: 1 — массив штабеля кучного выщелачивания; 2 — заезд на штабель; 3 — уступ штабеля; 4 — трубопровод рабочих растворов; 5 — насосная станция; 6 — зумпф продуктивных растворов; 7 — гидронепроницаемое основание; 8 — трубы для зарядов ВВ; 9 — оросительная система

После отсыпки на поверхности кучи монтируется оросительная сеть, посредством которой проводят орошение кучи выщелачивающим раствором. Полиэтиленовые трубы укладываются из расчета, что каждое отверстие должно орошать рудную массу на участке размером 1.5×1.5 м, а вся поверхность штабеля покрыта равноудаленными друг от друга отверстиями.

При орошении часть раствора при контакте с кислородом может окисляться с образованием коллоидной соли. Наличие коллоидной соли в растворе может привести к образованию внутри кучи гелеобразного изолирующего слоя, способного полностью прекратить доступ раствора к кускам руды. Кроме того, в глинистых породах при орошении может возникнуть эффект коагуляции. По этим причинам снижается содержание полезного компонента в продуктивном растворе, затрачивается больше времени на выщелачивание. Образующийся в процессе выщелачивания продуктивный раствор собирают и анализируют на содержание в нем полезного компонента.

Выщелачивание золота осуществляется 0.1% азрированным раствором цианида натрия, подаваемым через оросительную систему на штабель руды. Извлечение золота кучным выщелачиванием цианистыми растворами основано на взаимодействии цианида натрия с минералами. Степень этого взаимодействия зависит от ряда факторов: вещественного и минералогического состава руды, ее физических и химических свойств, внутренней и внешней поверхности рудных кусков, свойств и концентрации реагента и динамики его движения в рудных кусках.

Реакция растворения золота в цианистом растворе выглядит следующим образом:



С повышением концентрации цианида скорость растворения золота возрастает и достигает максимума (при концентрации около 0.1 %), дальнейшее повышение концентрации цианида не увеличивает скорости и даже, наоборот, вызывает некоторое замедление процесса (рис. 3а).

Уменьшение скорости растворения при высоких концентрациях цианида объясняется повышением рН раствора в результате протекающего гидролиза.

Однако высокая щелочность снижает скорость растворения золота, причем в области рН = 12 – 14 это снижение наиболее существенно (рис. 3б).

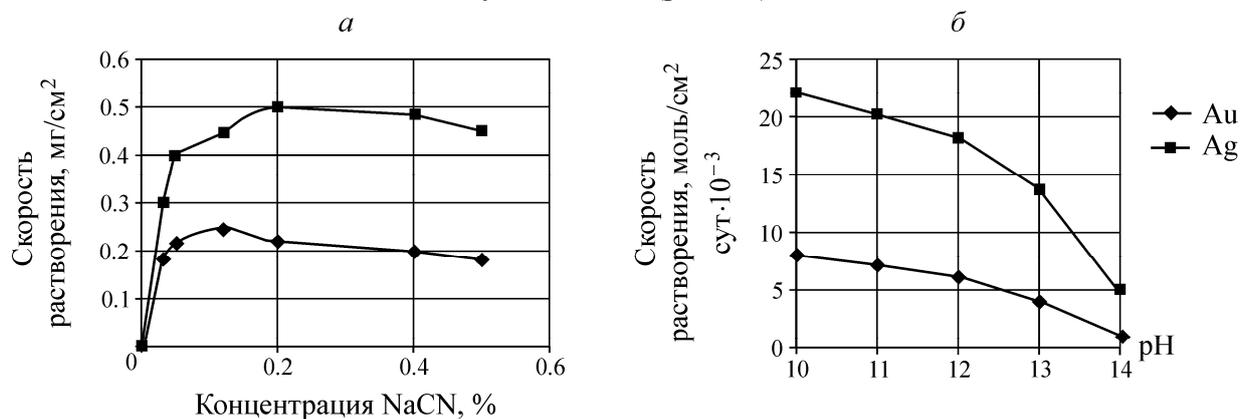


Рис. 3. Влияние на скорость растворения Au и Ag: а — концентрации цианида; б — рН

Вследствие протекающего гидролиза цианистые растворы имеют щелочной характер даже в том случае, когда свободную щелочь в раствор не вводят, но при этом повышается расход цианида на выщелачивание и увеличивается токсичность процесса за счет выделяющейся синильной кислоты HCN. Доля цианида, который присутствует в растворе в виде HCN, зависит от рН раствора. При рН = 10.5 в растворе присутствует около 6.1 % цианида в виде HCN. Доля синильной кислоты увеличивается до 17 % при рН = 10.0, до 39 % — при рН = 9.5 и до 67 % — при рН = 9.0.

Практически концентрация растворенного кислорода в растворе не превышает 8 мг/л, следовательно повышение концентрации свободного цианида выше 0.1 % окажется бесполезным и не даст ускорения процесса, а лишь приведет к перерасходу цианида. Учитывая, что выщелачивающие расходы готовятся из оборотных растворов, т. е. многократно используемых, перед подачей в штабель они подвергаются аэрации диспергированным воздухом.

Выщелачивающий раствор готовится из оборотных технологических растворов путем добавления необходимого количества крепкого раствора цианида натрия и доведения в случае необходимости рН раствора до 11 – 11.5 подачей известкового молока.

Экспериментально установлено, что в начале процесса выщелачивания концентрация металла в продуктивных растворах быстро возрастает вследствие вытеснения поровой воды и изменения рН растворов, достигая максимального значения. Этот период характеризуется постоянной концентрацией металла в растворах. Затем содержание металла в растворах постепенно снижается до 15 % и скорость фильтрации растворов реагента понижается до 0.1 м/сут, что свидетельствует о возникновении процесса коагуляции кучи. Это, в свою очередь, требует значительного времени на извлечение оставшегося в руде металла. Как следствие, повышаются непроизводительные затраты, а общий экономический эффект применения процесса выщелачивания снижается.

В этих случаях взрывание низкоплотных ВВ на основе пенополистирола (джемполитов) в режиме встряхивания рудной массы с целью раскрытия имеющихся трещин и повышения их проводимости может обеспечить повышение проницаемости массива при невысоких затратах.

При низкоплотном управляемом взрыве происходит рыхление и дополнительное дробление отвала руды вокруг каждой скважины без большого разброса и перемещения взрываваемой массы. В крупнокусковых рудах образуются трещины, которые способствуют увеличению скорости просачивания выщелачивающих растворов и повышению процесса кучного выщелачивания [3]. Смесевые ВВ джезполиты представляют собой механическую смесь промышленных аммиачно-селитренных ВВ и гранулированного пенополистирола (ГПП) или смесь аммиачной селитры с ГПП.

Для получения равномерной структуры при зарядании скважин по высоте заряда, снижения пылеобразования, электризации и чувствительности их к электроискровым разрядам к основным компонентам добавляются структурирующий агент натрий-карбоксиметилцеллюлоза (Na-КМЦ) и вода, согласно технологического регламенту, установленному для каждого образца смесевых ВВ.

Применение синтетического материала — полистирола горючей марки ПСВ в качестве компонента взрывчатой смеси — обосновано тем, что шарики полистирола, находящиеся между гранулами ВВ в определенной пропорции (от 20 до 90%), позволяют регулировать плотность смеси в пределах 0.9–0.2 г/см<sup>3</sup> за счет собственной низкой объемной массы (0.015–0.03 г/см<sup>3</sup>) и участвуют в реакции взрывчатого превращения (рис. 4а). При этом в зависимости от содержания пенополистирола в пределах от 20 до 90% по объему насыпная плотность смесевых ВВ меняется от 0.9 до 0.2 г/см<sup>3</sup>, а скорость детонации — от 1600 до 4200 м/с.

Анализ результатов испытаний показывает, что смесевые ВВ джезполиты по сравнению со штатными промышленными ВВ дают возможность в широких пределах регулировать скорость детонации и величину давления газов взрыва от 0.1·10<sup>8</sup> до 1.6·10<sup>8</sup> Па путем повышения или снижения плотности заряда в пределах 0.18–0.74 г/см<sup>3</sup> (рис. 4б).

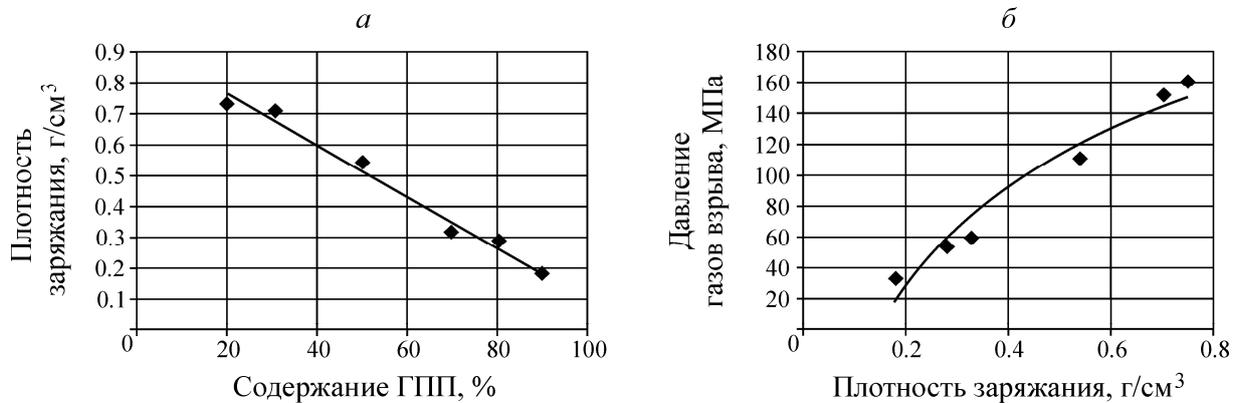


Рис. 4. Зависимости плотности заряжения джезполитами от соотношения ГПП (а) и давления газов взрыва от плотности заряжения (б)

Удельный расход ВВ [4] на встряхивание рудной массы в условиях зажатой среды и объемного нагружения взрывом определяется исходя из общего энергетического уравнения процесса разрушения пород взрывом:

$$q = 0.19 \rho_n \frac{1}{K_g^{0.07}} (0.6 + 3.3 \cdot 10^{-3} d_3 d_0) \left( \frac{0.5}{S_k} \right)^{\frac{2}{5}} K,$$

где  $\rho_n$  — объемная плотность пород, т/м<sup>3</sup>;  $K_g$  — показатель дробимости, м<sup>3</sup>;  $d_3$  — диаметр заряда, м;  $d_0$  — средний размер отдельности в куче, м;  $S_k$  — размер кондиционного куска, м;  $K$  — коэффициент, учитывающий теплоту взрыва эталонного и применяемого ВВ.

Теоретически и экспериментально доказано, что удельный расход ВВ при повторном рыхлении пород в условиях объемного нагружения в 1.5–2 раза ниже удельного расхода ВВ при дроблении ненарушенных пород. КПД взрыва в специфических условиях встряхивания и дробления руды не превышает 0.02–0.03.

Опыт подготовки руд для выщелачивания показывает, что наиболее равномерное рыхление и дополнительное дробление при прочих равных условиях достигается при параллельном расположении скважин. С учетом необходимости получения равномерно раздробленной руды рекомендуется параллельное расположение скважин.

Для интенсификации процесса кучного выщелачивания разработаны опытные параметры буровзрывных работ для дополнительного рыхления и встряхивания кучи. При этом в заранее заготовленные внутри кучи трубы заряжаются низкоплотные ВВ — джезполиты марки ДП-2АМ. Глубина скважин составляет 2500 мм (рис. 5).

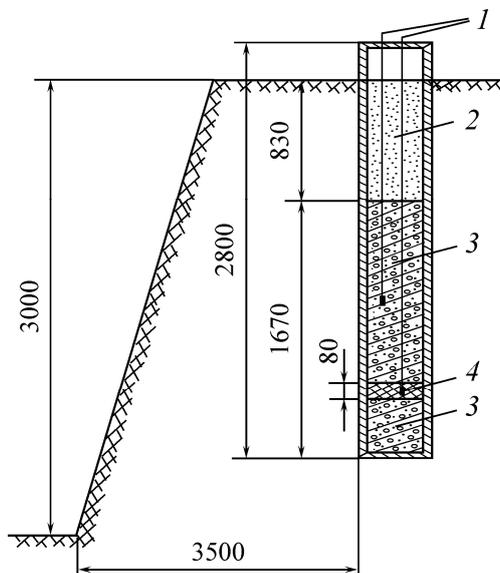


Рис. 5. Конструкция скважинного заряда для дополнительного рыхления кучи с применением джезполита ДП-2АМ: 1 — зажигательная трубка; 2 — забойка; 3 — ВВ джезполит; 4 — инициальный заряд из промышленного ВВ

Для усиления иницирующего импульса после опускания промежуточного детонатора в скважину засыпается промышленное ВВ (можно использовать аммонит) в количестве 4–6% от общей массы заряда скважины. В качестве промежуточного детонатора можно использовать тротилловую шашку марки Т-400, и заряд ВВ инициируется с помощью капсюля детонатора. Количество скважин для данной кучи 45 шт. Средний удельный расход ВВ составил  $0.45 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент разрыхления 1.1.

Взрывное встряхивание кучи проводится одиночными зарядами без интервала замедления в зависимости от степени кольматирования заскладированных руд и результатов лабораторного анализа продуктивного раствора. Кольматированные участки кучи определяются визуально в зависимости от степени проникновения оросительного раствора.

В период выщелачивания опытной кучи проведено два взрывных воздействия: первое — на шестом месяце процесса выщелачивания (взорвано 11 скважин), второе — на девятом (взорвано 8 скважин). Итого из 45 подготовленных скважин задействовано 19.

Скважины заряжаются непосредственно перед взрывом индивидуально, т. е. заряжается одна скважина и проводится взрыв без замедления. Вторая скважина заряжается через 20–25 мин после взрыва предыдущей, и в таком порядке проводится взрыв остальных скважин.

Регулирование распределения энергии взрыва осуществляется за счет изменения плотности заряда в пределах  $0.18-0.74 \text{ г/см}^3$  в зависимости от объема горной массы, подверженной эффекту кольтации. Регулирование плотности заряда в указанных пределах позволяет без разброса и выброса встряхивать рудную массу на штабеле.

Расчетные параметры взрывания скважинных зарядов при встряхивании кучи:

Показатель степени дробления, мм	0.6
Удельный расход ВВ, $\text{кг/м}^3$	0.45
Общая масса заряда на одну скважину, кг	10.5
Плотность заряжения скважин, $\text{кг/см}^3$	0.4
Линия наименьшего сопротивления, м	4.5
Расстояние между скважинами, м	8
Длина скважинного заряда, м	1.65
Длина забойки, м	0.85

После взрыва первой части из общего количества скважин продуктивный раствор снова анализируется на содержание в нем полезного компонента. Результаты промышленных испытаний показали, что после взрывного воздействия на штабель содержание металла увеличивается на 10–15 % (таблица), скорость проницаемости рудной массы повышается в 2 раза, время извлечения полезного компонента сокращается на 25–30 %.

Изменение содержания золота в продуктивном растворе во времени для различных периодов выщелачивания (до и после воздействия на кучу)

Показатель	Время выщелачивания, мес											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Содержание золота в продуктивном растворе, %	97	42	13	12.1	10.4	78	67	24	81	38	22	—

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных исследований показал, что при управляемом взрыве происходит рыхление и дополнительное дробление рудной массы вокруг каждой скважины, в крупнокусковых рудах образуются трещины, которые способствуют увеличению скорости просачивания выщелачивающих растворов и повышению процесса кучного выщелачивания.

Предлагаемая технологическая схема рыхления позволяет без демонтажа оборудования и оросительной коммуникации проводить дополнительное рыхление рудной кучи, повысить скорость выщелачивания и значительно уменьшить время технологического процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 36313. Способ кучного выщелачивания полезных ископаемых / М. И. Жаркенов, Е. Т. Сердалиев // Оpubл. в БИ. — 2001. — № 0380.1.
2. Токтамысов М. Т., Жаркенов М. И., Сатыбалдин О. Б. Эффективность выщелачивания отвалных и бедных руд цветных и черных металлов Казахстана. — Алма-Ата, 1993.
3. Жаркенов М. И., Сердалиев Е. Т. Малоплотные взрывчатые вещества на основе пенополистирола для рыхления отвала руд при кучном выщелачивании // Вестн. КазНУ. — 2003. — № 2.
4. Жаркенов М. И., Урумов Т. Т., Бекетаев Е. Б., Плошенко Т. П. Новая технология взрывных работ на карьерах на основе применения гранулированного пенополистирола в скважинных зарядах. — Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1987.

Поступила в редакцию 21/IX 2013