

УДК 622.235

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ВЫЕМКИ РУД И ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛОГИХ ЖИЛ**

**К. Н. Трубецкой<sup>1</sup>, Ю. П. Галченко<sup>1</sup>, А. С. Шуклин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем комплексного освоения недр им. Н. В. Мельникова РАН,  
E-mail: schtrek33@mail.ru, Крюковский тупик, д. 4, 111020, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*ООО “Ресурсы Албазино” (Полиметалл), E-mail: ashuklin@mirpao.ru,  
ул. К. Маркса, д. 62, к. 218, 660049, г. Красноярск, Россия*

Приведены результаты экспериментального исследования процессов разнонаправленной взрыводоставки породной и рудной части отбиваемого объема для условий подземной разработки пологопадающих жильных месторождений. Установлено, что при создании методов определения параметров отбойки необходимо учитывать не только линейную концентрацию энергии, но и динамику роста, сопротивления движению отбитой горной массы в узком очистном пространстве. По результатам моделирования построены графики изменения коэффициента доставки и скорости смещения фронта отбитой горной массы в зависимости от геометрических параметров и энергетических характеристик модели. Показано, что при отбойке и перемещении в очистном пространстве рудной части отбиваемого объема существует эффект дополнительного дробления материала за счет его соударения с кровлей очистного пространства.

*Пологие жилы, разработка, разнонаправленный отброс взрывом, породная масса, эффективность взрыводоставки, рудная масса, дополнительное дробление*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180209

Рост потребления минерально-сырьевых ресурсов связан как с постепенным истощением запасов минерального сырья, так и с опережающим освоением месторождений с благоприятными условиями разработки. Поэтому основные перспективы развития минерально-сырьевого комплекса будут связаны с необходимостью массового освоения труднодоступных месторождений, представленных рудными телами со сложными горнотехническими условиями разработки, среди которых заметное место занимают пологие и наклонные жилы малой мощности [1].

Доминирующая в настоящее время парадигма геотехнологий, основанная на приоритете валовой выемки руд с прихватом вмещающих пустых пород и последующим разделением их в процессе обогатительного передела, приводит к дополнительным нецелевым затратам трудовых, материальных и энергетических ресурсов на добычу, транспорт, дробление и измельчение больших объемов безрудных горных пород, примешиваемых к полезному ископаемому в процессе его извлечения из недр, а также к накоплению на земной поверхности больших объемов твердых отходов. Все это находится в противоречии с моделью устойчивого развития природы и общества, основой которой является идеология энерго- и ресурсосбережения, в сочетании с приоритетной необходимостью сохранения естественной биоты Земли [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-37-00050).

Один из реальных путей решения этого противоречия в сфере развития минерально-сырьевого комплекса — смена парадигмы развития горной технологии в направлении перехода к экогеотехнологиям с избирательной (селективной) выемкой полезного ископаемого. Рассматривая структуру и взаимосвязи технологических и физических процессов добычных работ при создании геотехнологий с избирательной выемкой полезного ископаемого, можно выделить два принципиально различных направления развития этой идеи:

- разделение руды и породы непосредственно в забое при ведении очистной выемки за счет их разнонаправленного отброса взрывом в очистном пространстве;
- разделение руды и породы за пределами очистных выработок на стадии доставки и транспортирования добытой горной массы литосферы посредством целенаправленного изменения степени дробления в процессе очистной выемки (избирательное дробление руды).

На основе результатов системного анализа структуры добычных работ с использованием методов избирательной выемки полезного ископаемого принята методология последовательной декомпозиции этих работ на взаимосвязанные структурные элементы [4]. При разнонаправленном перемещении компонентов наибольшим “структурным весом” в общей системе действий обладает процесс перемещения взрывом раздробленного вещества литосферы, составляющий основу технологического процесса взрыводоставки горной массы. Поэтому цель проведенных экспериментов заключалась в выявлении закономерностей перемещения взорванной массы в пространстве ограниченной мощности.

В процессе очистной выемки исполнительная подсистема, реализующая разделение руды и породы, состоит из комплекса процессов, обеспечивающих их отбойку в забое и эффективное разделение путем разнонаправленного отброса. Определяющее влияние на уровень количественных показателей очистной выемки оказывает операция взрыводоставки отбиваемой породной части обуренного массива в направлении линии падения жилы, а качественные показатели зависят от результатов отбойки рудной части массива, перемещаемой взрывом перпендикулярно линии падения жилы (рис. 1).

От полноты перемещения породной массы зависит эффективность отбойки рудной части обуренного массива, а также эффективность дополнительного дробления рудной массы за счет использования ее кинетической энергии при ударе о кровлю очистного пространства, так как замкнутое рабочее пространство исключает получение данных о качестве взрывной подготовки прямыми или косвенными методами измерения. В связи с этим были выполнены лабораторные исследования с применением метода имитационного моделирования.

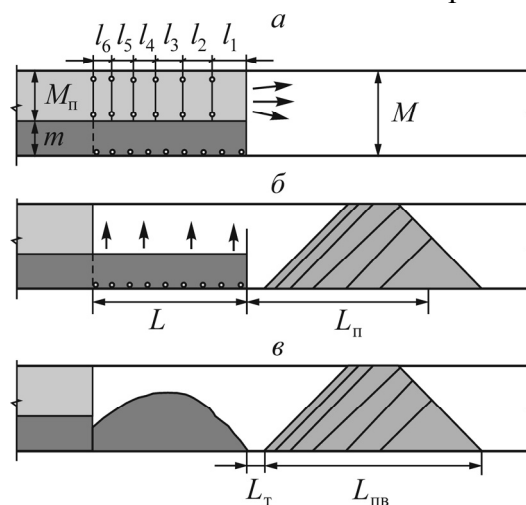


Рис. 1. Схема последовательности операций при раздельной выемке: а — до начала отбойки; б — после отбойки породы; в — после отбойки жилы

В соответствии с основополагающими положениями теории подобия и теории размерностей, в качестве критериев подобия при моделировании выбраны безразмерные комбинации шести переменных, характеризующих процесс отбойки и перемещения материала модели [5, 6]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f\left(\frac{\Delta q_0}{\sigma_m w^2}; \frac{l_i}{M}; \frac{M}{w}\right), \quad K_d = \frac{Q_2}{Q_1},$$

где  $Q_1$  — объем материала модели, доставленной взрывом в очистное пространство,  $m^3$ ;  $Q_2$  — общий объем очистного материала модели,  $m^3$ ;  $\Delta q_0$  — линейная концентрация энергии в зарядах, Дж/м;  $w$  — линия наименьшего сопротивления, м;  $\sigma_m$  — прочность материала,  $H/m^2$ ;  $M$  — мощность очистного пространства, м;  $l_i$  — расстояние перемещения материала, м;  $K_d$  — коэффициент доставки.

Модель разрушаемой среды представляет собой двухслойную систему, в которой нижний слой, моделирующий рудное тело, выполнен глиной с влажностью 10%, а верхний сформирован из кварцевого песка с размером частиц 1 мм, в котором в качестве связующего материала использовалась канифоль (3%). Процессы разрушения и перемещения материала модели фиксировались видеокамерой со скоростью 500 кадров в секунду. Отбойка проводилась в два этапа: на первом отбивали и перемещали взрывом в очистное пространство верхний слой (породная часть массива), а затем отбивали на месте залегающий нижний слой (рудная часть) без перемещения отбитого материала в очистное пространство [7]. Источником энергии служили никромовые проволочки, на которые подавалась энергия, накопленная конденсаторами емкостью  $1 \cdot 10^6$  пф, при силе тока от 20 до 200 А [5]. Схема модели приведена на рис. 2.

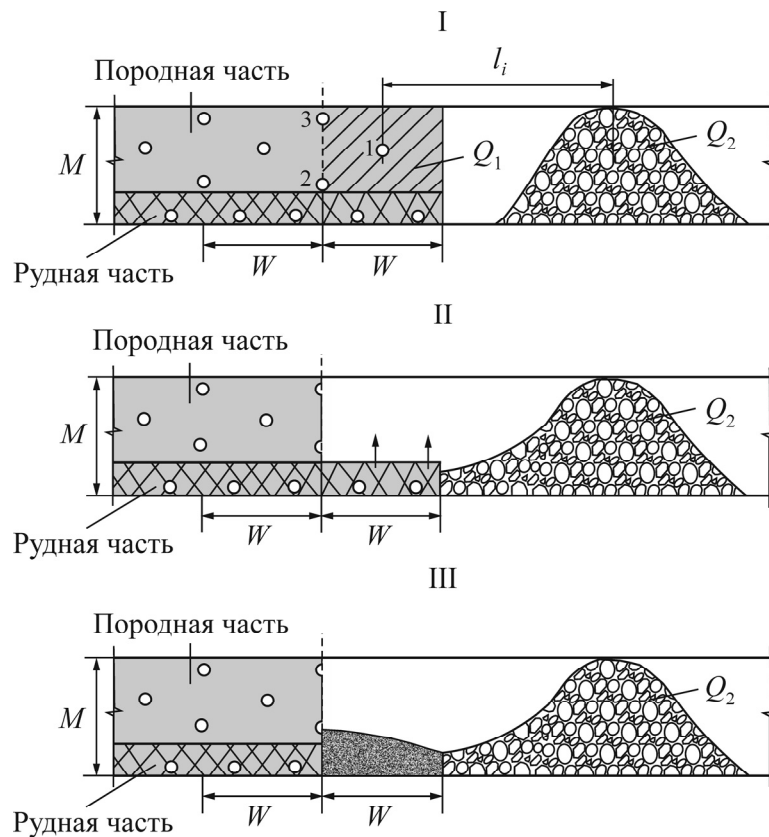


Рис. 2. Схема модели и последовательность взрывания при проведении лабораторных исследований

В результате проведенных экспериментов для породной части отбиваемого массива установлена зависимость коэффициента доставки  $K_d$  от величины линейной концентрации энергии  $\Delta q_0$  при двух значениях соотношений между выемочной мощностью  $M$  и линией наименьшего сопротивления  $W$  (рис. 3).

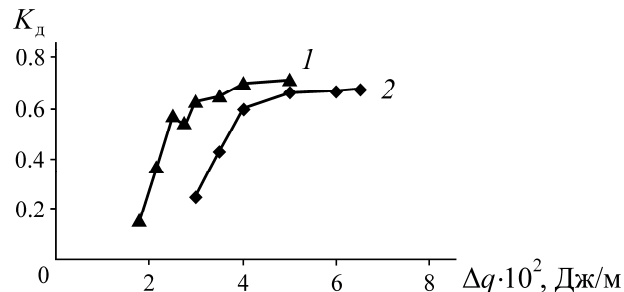


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента доставки от линейной концентрации энергии  $\Delta q_0$  при различных соотношениях выемочной мощности  $M$  и линии наименьшего сопротивления  $W$ : 1 —  $M/W=2.0$ ; 2 —  $M/W=1.4$

Как видно из рис. 3, отношение  $M/W$  не влияет на характер изменения коэффициента доставки, но оказывает воздействие на его величину (кривая 1 всегда выше кривой 2). Это означает, что с ростом концентрации энергии в зарядах объем отброшенного в очистное пространство материала возрастает, но при малых значениях выемочной мощности рост происходит значительно медленнее. Таким образом, увеличение отброса материала с ростом расхода энергии происходит за счет увеличения ширины развала отбитого материала, что в природных условиях приведет к резкому снижению эффективности процесса доставки отбитой рудной массы в пространстве очистного блока.

Влияние другого безразмерного критерия  $l_i/M$  на коэффициент доставки показано на рис. 4, из которого следует, что выемочная мощность возрастает по мере увеличения длины доставки. Это означает, что использование технологии с разнонаправленным отбросом руды и породы взрывом проводится в пределах выработанного пространства переменной высоты. При взрывании первых рядов скважин отбитый ими объем породы перемещается в очистном пространстве с высотой, равной полной выемочной мощности. При отбойке последующих объемов все большая доля общей траектории движения породной массы находится в пределах узкой щели, высота которой меньше высоты очистного пространства на величину мощности жилы. Поэтому в процессе отбойки всей выемочной прирезки сопротивление движению отбитой породой массы динамично возрастает, а эффективность взрыводоставки, соответственно, снижается, что выражается в сокращении показателя доставки горной массы.

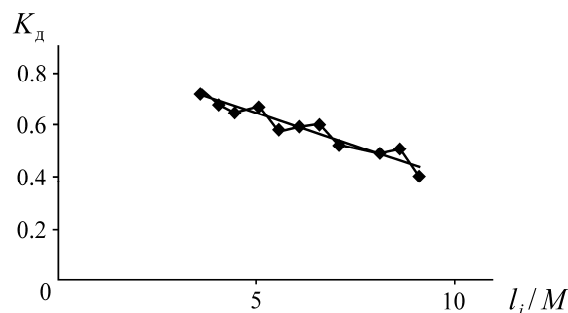


Рис. 4. Зависимость коэффициента доставки от безразмерного критерия  $l_i / M$  при линейной концентрации энергии  $\Delta q_0 = 2.2 \cdot 10^7$  Дж/м

Об этом свидетельствует также полученная зависимость дальности отброса от удельной энергии зарядов на рис. 5, из которого видно, что сопротивление движению отбитой горной массы снижает дальность взрыводоставки, несмотря на увеличение энергии зарядов. Характер зависимости свидетельствует о том, что при определении параметров буровзрывных работ необходимо увеличивать энергонасыщенность каждого очередного отбиваемого слоя в соответствии с возрастающим сопротивлением взрыводоставке горной массы в узком очистном забое.

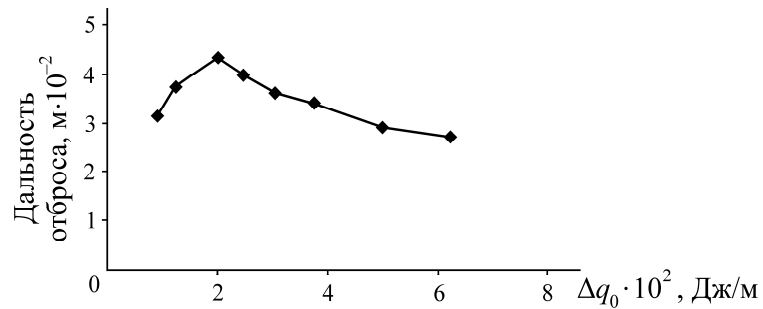


Рис. 5. Зависимость дальности отброса горной массы от удельной энергии на отбойку

Для обеспечения равномерного насыщения энергией процесса взрыводоставки необходимо рассмотреть возможность изменения интервалов замедления с целью создания в очистном пространстве направленного движения потока взорванной горной массы. Проведена дополнительная серия опытов, в которых отбойка осуществлялась последовательно со скоростной видеосъемкой движения отбитого материала. Полученные видеозаписи обработаны с применением метода графического дифференцирования [6]. В результате определены скорости смещения головной части потока перемещенной взрывом горной массы в разные моменты времени. На рис. 6 приведены экспериментальные кривые, характеризующие изменение этого показателя во времени. При взрыве верхнего заряда передний фронт взорванной горной массы сначала движется с ускорением, по мере роста взаимодействия со стенками очистной щели теряет свою скорость, но в результате взрыва нижнего заряда скорость снова возрастает.

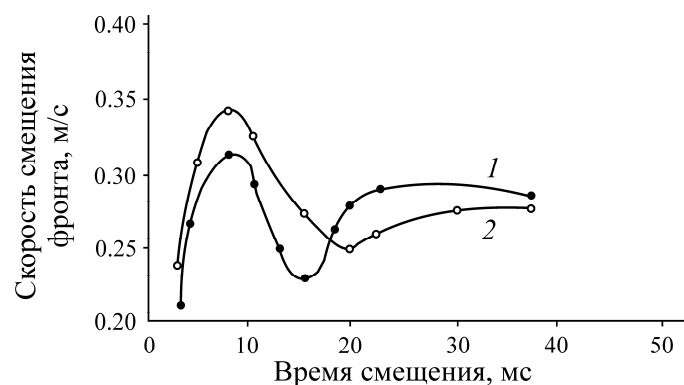


Рис. 6. Изменение скорости смещения переднего фронта взорванной массы  $V$  во времени  $t$ :  
 1 — взрыв нижнего заряда; 2 — взрыв верхнего заряда

На основании анализа эпюр скоростей установлено, что максимальная эффективность взрыводоставки отбитой породной массы обеспечивается, если интервал между рядами скважин будет равен времени детонации зарядов, а интервалы замедления между скважинами в ряду будет втрое меньшими.

После отбойки и взрыводоставки в очистное пространство породной части обуренного массива проводится отбойка его рудной части, оставляемой в почве очистного пространства. Расстояние между скважинами здесь определяется по стандартным методикам по условиям полноты выемки участка рудного тела. Отбитая рудная масса отбрасывается в направлении, перпендикулярном направлению отброса породной массы, что позволяет повысить показатели полноты и качества выдаваемой из блока руды за счет эффекта дополнительного дробления отбитой руды при столкновении с кровлей очистного пространства [8].

Наличие этого эффекта проверено в ходе натурального эксперимента при отработке опытного участка на месторождении Бом-Горхон (Забайкальский край) со средней мощностью жилы 0.7 м и выемочной мощностью 1.7 м.

Объемные показатели определялись прямым маркшейдерским замером, а качество дробления — методом фотопланиметрии с отработкой планограмм на компьютере по программе “Грансостав-2008”, разработанной в ИПКОН РАН. Установлено, что средний диаметр куска отбитой рудной массы уменьшился почти на 20 % с 82.9 до 69.4 мм за счет полного устранения негабаритных фракций (+400 мм) и резкого (до 2–3 %) снижения выхода наиболее крупных фракций (+100 мм), которые были разрушены кинетической энергией при остановке выброшенных взрывом кусков у кровли очистного пространства [9].

Использование этого эффекта открывает реальную перспективу сокращения энергозатрат на крупное дробление горной массы при подготовке к обогащению вплоть до полного отказа от этой технологической операции.

## ВЫВОДЫ

На основе объединенного анализа условий разработки пологопадающих маломощных жил и применяемых геотехнологий показана необходимость смены парадигмы их развития в направлении использования методов селективной выемки полезного ископаемого в процессе очистных работ.

Установлено, что непосредственное влияние на уровень количественных показателей очистной выемки оказывает операция взрыводоставки отбиваемой породной части обуренного массива в направлении линии падения жилы, а качественные показатели полностью определяются результатами отбойки рудной части массива, перемещаемой перпендикулярно линии падения жилы.

В результате выполненного имитационного моделирования отбойки породной части отбиваемого массива получены зависимости коэффициента доставки от линейной концентрации энергии в зарядах и геометрических параметров очистного забоя, что послужило основанием методики выбора параметров отбойки с переменной энергонасыщенностью отбиваемых слоев.

На основании анализа эпюр скоростей смещения переднего фронта, перемещаемого взрывом объема породной массы, выявлено, что максимальная эффективность взрыводоставки обеспечивается в том случае, когда интервал замедления между рядами скважин будет равен времени детонации зарядов, а интервалы замедления между скважинами будут втрое меньшими.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trubetskoy K. N., Galchenko YU. P. Naturelike mining technologies: prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere. Herald of the Russian Academy of Science, 2017, Vol. 87, No. 4. — P. 378–384. doi: 10.1134/S1019331617040050.

2. **Галченко Ю. П., Сабянин Г. В.** Проблемы геотехнологии жильных месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2011. — 408 с.
3. **Pickering R. G. V.** Presidential address: Has the South African narrow reef mining industry learnt how to change, J. of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007, Vol. 107. — P. 557–565.
4. **Бусленко Н. П.** Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 399 с.
5. **Друкованный М. Ф., Комир В. М., Кузнецов В. М.** Действие взрыва в горных породах. — Киев: Наук. думка, 1973. — 183 с.
6. **Кротков В. В., Лобанов Д. П., Нестеров Ю. В., Абдульманов И. Г.** Горно-химическая технология добычи урана. — М.: ГЕОС, 2001. — 368 с.
7. **Насонов И. Д., Ресин В. И.** Моделирование физических процессов в горном деле. — М.: АГН, 1999. — 343 с.
8. **Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Шуклин А. С.** Высокоэффективная геотехнология комплексного освоения пологих и наклонных жильных месторождений // Горн. журн. — 2018— №2 — С. 73–77.
9. **Галченко Ю. П., Лизункин М. В., Шуклин А. С.** Экологические особенности применения раздельной выемки при подземной разработке пологих жил // Экол. системы и приборы. — 2012. — № 11. — С. 57–63.

*Поступила в редакцию 9/XI 2017*