

УДК 622.235

**К ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ПРЕДПОСЫЛКАМ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА
ПРИ КРУПНОМАСШТАБНОМ И СЕЛЕКТИВНОМ ВЗРЫВАНИИ
ГОРНЫХ ПОРОД В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ**

С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, А. А. Осокин

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: osokin_alex-r@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Впервые сделана попытка теоретического рассмотрения действия взрыва при крупномасштабном взрывании в сложных горно-геологических условиях, включая селективную отбойку. Рассмотрена идея использования направленного действия энергии взрыва за счет применения зарядов различной формы, которая на практике реализуется путем замены единичного заряда большого диаметра на пучок эквивалентных по общей энергии зарядов меньших размеров. Обсуждаются новые возможности по управлению процессами передачи и распределения в разрушаемом массиве энергии взрыва.

Открытые горные работы, подземная разработка, геотехнологии, вскрышные работы, взрывчатое вещество, структура горной породы, масштаб отбойки, конструкции зарядов

Развитие взрывного разрушения массивов горных пород определило ряд направлений, одно из которых связано с увеличением размеров выемочной единицы массива, приходящейся на один заряд и, как следствие, ростом параметров отбиваемого слоя и применением современной технологии крупномасштабной взрывной отбойки концентрированными зарядами [1].

Можно констатировать, что известный прогресс в горном деле в буровзрывной его части в последние десятилетия связан с развитием этого научно-технического направления на базе увеличения масштаба взрывного разрушения массивов горных пород и разработки соответствующих конструкций зарядов и взрывчатых веществ [2].

Принципиальным моментом явилась реализация идеи перехода от традиционного скважинного заряда с круглой формой сечения и взрывной волны к заряду практически любой формы при равной энергии ВВ. Впервые на технологическом уровне удалось увеличить массу и мощность одного скважинного заряда не за счет увеличения диаметра бурения, а методом деконцентрации (рассредоточения) ВВ в группе (пучке) нескольких близко расположенных параллельно-сближенных скважин. Взрыв пучка таких зарядов, с одной стороны, воспроизводит взрыв одного эквивалентного заряда, а с другой — принципиально изменяет механизм управления действием взрыва.

Дело в том, что после завершения процесса детонации зарядов ВВ в сближенных скважинных зарядах происходит разрушение породных “перемычек” между ними и далее сложение (взаимодействие) волн напряжений от отдельных зарядов с формированием общей волны, форма которой зависит от конфигурации расположения скважинных зарядов, а интенсив-

ность — от диаметра скважин и типа ВВ, т. е. от геометрических и физических параметров пучка. В результате при взрыве такого заряда во взрываемом массиве достигается эффект образования взрывной волны заданной формы с потоком энергии в направлении, заданном требованиями горного производства.

Численными и экспериментальными методами исследовано влияние геометрии расположения пучка параллельно-сближенных скважинных зарядов во взрываемом массиве на параметры полей напряжений в различных направлениях. Рассматривалось крупномасштабное взрывное разрушение рудных массивов различными концентрированными зарядами при различных системах подземной разработки. Теоретическая основа этого направления базировалась на ряде предпосылок, описывающих различные аспекты механизма действия взрыва в пучке сближенных скважин и позволяющих создать методологию и методики расчета крупномасштабного взрывания, удовлетворяющих практическим требованиям.

Наблюдается постоянное ухудшение горно-геологических условий разработки месторождений, связанное с понижением глубины разработок, усилением негативных проявлений геомеханических явлений, необходимостью вовлечения в разработку труднодоступных месторождений со сложными условиями, требующими селективной выемки с применением крупномасштабного взрывания. В условиях рыночной экономики это предъявляет дополнительные требования к горным технологиям взрывной отбойки и обуславливает необходимость разработки новых подходов в теоретических исследованиях.

На основе анализа известных работ в данном направлении определился ряд задач технологического характера, для решения которых потребовался новый концептуальный теоретический подход. В связи с расширением области применения крупномасштабного способа взрывного разрушения массивов горных пород в сложных условиях появилась необходимость в обосновании:

- уточненного расчета параметров сетки скважин из-за увеличенных нагрузок на один заряд;
- направленного действия взрыва или увеличения его доли как в обычных условиях, так и при селективной разработке;
- выбора варианта буровзрывных работ по некоторому масштабному обобщенному показателю.

Использование существующих методик, как показал анализ расчетных данных, оказалось малопримемым. В методике расчета величины заряда при отбойке руд большими зарядами ВВ направленного действия при подземной отбойке был использован и развит фактор масштабного эффекта на основе анализа известной формулы

$$Q = qV \quad (1)$$

и ее модификации с целью получения необходимой степени дробления при любых объемах и условиях крупномасштабного взрывания. Был выявлен главный ее недостаток — не учитывалась степень дробления горной массы. Модернизация соотношения (1) заключалась в представлении величины удельного расхода q как функции от V , что привело к дифференциальному уравнению

$$dQ = q(V)dV, \quad (2)$$

учитывающему качество дробления горной массы в зависимости от объема (масштаба) взрывания. Зная зависимости удельного расхода ВВ от линии наименьшего сопротивления W для горных пород различной трещиноватости и крепости, можно определить величину заряда с учетом степени дробления. Из формулы (2) следует $dQ/dV = q(V) = q(V(W)) = q(W)$. Отсюда

$$Q(V_1) = Q_0 + \int_{V_0}^{V_1} q(W) dV. \text{ Переходя к интегрированию по } W, \text{ имеем } Q(W_1) = Q_0 + \int_{W_0}^{W_1} q(W) \frac{dV}{dW} dW.$$

Предполагая, что $V = \alpha h W^2$, где h — длина скважин, α — безразмерная константа, получим зависимость

$$Q(W_1) = Q_0 + 2\alpha h \int_{W_0}^{W_1} q(W) W dW. \quad (3)$$

Она отражает как “традиционно” объем разрушаемого слоя горной породы ($q = \text{const}$, формула (1)), так и дополнительно, “интегрально”, степень его дробления ($q = f(W)$, формула (3), новый фактор). На основании анализа опытных данных функцию $q = f(W)$ в формуле (3) можно представить в виде следующей зависимости:

$$q = q_0 + kW^\varphi, \quad (4)$$

где q_0 — удельный расход ВВ при W_0 , соответствующем нижнему пределу интеграла в формуле (3); член kW^φ — масштабная добавка, соответствующая увеличению линии наименьшего сопротивления (ЛНС); k, φ — коэффициенты пропорциональности и масштабности соответственно.

Подставляя формулу (4) в выражение (3), получим:

$$Q(W_1) = \alpha h W_1^2 q_0 + \frac{2\alpha h k}{\varphi + 2} (W_1^{\varphi+2} - W_0^{\varphi+2}). \quad (5)$$

Формулы (4), (5) рассмотрены для всех типов руд от сильнотрещиноватых до относительно монолитных с условием получения приблизительно одинаковой степени дробления. Выявлена их сильная зависимость от степени трещиноватости массива горных пород (~ 70 %), слабая — от крепости f пород (~ 20 %). По мере уменьшения трещиноватости характер зависимости (5) меняется. Наиболее сильная связь проявляется в рудах не- или малотрещиноватых, уменьшаясь по мере постепенного увеличения степени трещиноватости, и с привязкой к размеру кондиционного куса достигает относительного минимума в рудах среднетрещиноватых. Она отражает “динамический” характер зависимости величин, гибко (оперативно) отслеживая в процессе расчета необходимое количество взрывчатых веществ для разных условий массового взрыва. Это возможно на стадии проектирования даже без производства “пристрелочных” взрывных работ, тогда как известные методики, исходя из базовой структуры формулы (1), привязаны к местным условиям взрывания.

Таким образом, зависимость (5), имея принципиально новое по сравнению с классической “статической” формулой (1) свойство управляемости, позволяет оперативно и дифференцированно учитывать геологическую структуру всего блока при крупномасштабном направленном массовом взрыве. По существующим методикам этому объему взрывающегося массива соответствовало бы другое, завышенное количество ВВ, отвечающее расчету по формуле (1).

Применяя обобщенный закон подобия при условии сохранения качества дробления неизменным, для сравнительного взрывания в одинаковых условиях из формул (4) и (5) при больших новых значениях W можно получить выражение, в которое входят, с соблюдением энергетического принципа, величины запаса энергии зарядов ВВ, сетка скважины и ЛНС:

$$\frac{Q_n}{Q_c} = \frac{E_n}{E_c} = \frac{S_n}{S_c} \left(\frac{W_n}{W_c} \right)^{\varphi+2}, \quad (6)$$

где индексы “н” и “с” соответствуют новым и старым сравниваемым значениям площадей сеток скважин (S), величин (Q) и энергии зарядов (E).

В этой формуле отслеживается добавка к основному заряду в формуле (5), необходимая для условия сохранения качества дробления при разных объемах взрываеваемого массива (масштабная поправка). В принципе, можно предварительно, не производя специальных опытных взрывов, на основании геологической информации рассчитывать крупномасштабные взрывы при очистной выемке в любых подземных условиях с получением одинакового качества дробления при разных параметрах (масштабах) взрывания. Данный методологический аспект может быть использован и в штатных методиках по буровзрывным работам после сопоставления и корректировки величин выемочной единицы массива и параметров ее скважинного заряда. Такая необходимость возникает при разработке новых технологий с крупномасштабной отбойкой.

Проблема направленного или управляемого действия взрыва в технологическом аспекте на практике при массовых взрывах реализуется вариантами коммутаций взрывных цепей обычных скважинных зарядов, взрывааемых последовательно. Влияние конструктивных особенностей зарядов при этом, как правило, сведено к минимуму из-за их отсутствия или практической не технологичности. Дело в том, что в базовой конструкции скважинных и шпуровых зарядов уже давно нет принципиальных изменений. Практически отбойка ведется монозарядами по модели расширяющегося взрыва, когда значительная часть концентрически расходящейся от заряда энергии взрыва уносится вглубь массива. Поэтому от 50 до 70 % (по разным оценкам) общей энергии заряда расходуется на технологически ненужное, а чаще всего вредное изменение состояния массива горных пород вне и внутри отбиваемого объема. Интересные геотехнологические перспективы появляются при создании способов разрушения пород с резкой асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в направлении обнаженных плоскостей разрушаемого массива. Возможность реализации этой идеи связана с использованием известного принципа кумуляции энергии взрыва за счет формы заряда [3]. На практике это реализуется в виде замены единичного заряда большого диаметра и мощности на группу эквивалентных по общей энергии зарядов меньших размеров. Открываются принципиально новые возможности по управлению процессами передачи и распределения в разрушаемом массиве энергии взрыва путем изменения параметров и пространственного положения каждого единичного заряда в группе единого при взрыве заряда [4].

При этом речь идет об обычных скважинных зарядах, конструирование из которых зарядов направленного действия практически никак не сказывается на технологичности их получения. Характерным примером может служить массовая отбойка в подземных условиях на подземных рудниках Горной Шории, когда при образовании центрального вертикального концентрированного заряда специальной конструкции большой массы в рудном блоке по форме близкой к цилиндрической, используются оконтуривающие сближенные пучковые заряды. Они размещаются на определенном расстоянии вокруг него и взрываются первыми. Управление действием взрыва заключается в направлении взрывной волны в сторону ранее обрушенного выработанного пространства с использованием компенсационных камер и вновь образующихся свободных поверхностей. При этом достигается необходимая степень дробления горного массива и обеспечивается защита от сейсмического действия зарядов большой массы. Расчет различных величин взрывных работ осуществляется с помощью зависимостей, базирующихся на предыдущих теоретических предположениях, а примеры различных конструкций пучковых сближенных скважинных зарядов направленного действия представлены в работе [5].

Данная идея имеет и другие интересные возможности практической реализации, одна из которых описана в [6]. В ней, в развитие работы [7], дано развернутое теоретическое обоснование перспектив использования принципа работы кумулятивного взрыва при разрушении горных пород скважинными зарядами. На рис. 1 представлена функциональная схема технологического кумулятивно-деконцентрированного заряда.

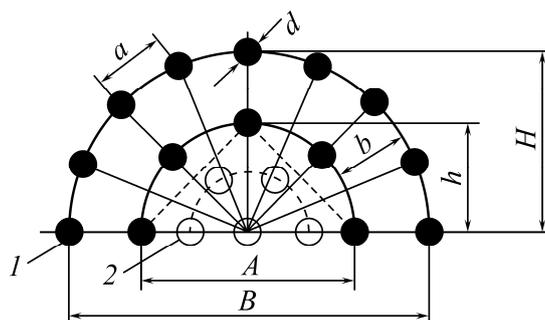


Рис. 1. Схема формирования кумулятивного децентрированного заряда из скважин одинакового диаметра: 1 — заряжаемые скважины; 2 — незаряжаемые скважины; a — расстояние между сближенными зарядами по контуру; b — расстояние между контурами сближенных зарядов; d — диаметр зарядов; h , H — внутренний и внешний радиусы заряжаемых скважин; A , B — внутренний и внешний диаметры контуров заряжаемых скважин

На основании теоретических исследований показано, что использование эффекта кумуляции при отбойке руд и пород крупномасштабными децентрированными зарядами открываются совершенно новые пути для повышения эффективности буровзрывного комплекса в рамках традиционных геотехнологий. Среди них можно отметить:

- отбойку на открытых горных работах без перебура;
- формирование дополнительных плоскостей обнажения в процессе отбойки больших блоков на карьерах;
- взрывную подготовку отрезных щелей при отработке крупных камер;
- снижение законтурного действия взрыва при слоевой выемке рудных тел малой и средней мощности.

Кроме того, появляется возможность создания принципиально новых геотехнологий, в которых необходимое по условиям дробления распределение энергии в отбиваемом массиве осуществляется не за счет создания в нем зарядных камер, заполненных ВВ, а под воздействием управляемых асимметричных потоков энергии от зарядов, расположенных вне разрушаемого объема.

Еще один аспект направленного взрывания с применением сближенных зарядов касается разработки сложных забоев при разрушении рудных и нерудных блоков месторождений полезных ископаемых, участки которых существенно различаются по горно-геологической структуре и качеству полезного компонента и выемка которых осуществляется валовым или раздельным (селективным) способом. Главное требование к взрывным работам здесь заключается в том, чтобы места размещения после взрыва горной массы с полезным ископаемым и пустыми породами обеспечивали наилучшие условия для раздельной выемки, а в идеале, чтобы после взрыва все оставалось на своих местах, в рамках начальной геометрии.

В ИПКОН РАН разработана такая технология (способ) производства взрывных работ при селективной разработке сложноструктурных месторождений на открытых горных работах (рис. 2). Она учитывает ее специфику и в ней отсутствует ограничение по энергии для последующих рядов скважинных зарядов, обусловленное возможностями буровой техники [8].

Способ характеризуется тем, что для выборочной степени дробления участков разнотипных горных пород в крайних скважинах пучковых сближенных зарядов ВВ устанавливают кумулятивные заряды с плоской симметрией линейной формы навстречу друг другу. По контакту участков разнотипных пород размещают кумулятивные заряды с плоской симметрией кольцевой формы с ориентированием оси кумулятивной выемки заряда по направлению контакта (рис. 3).

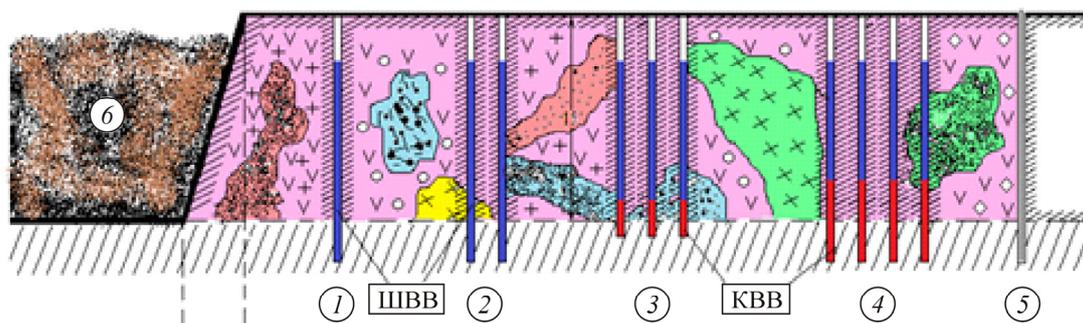


Рис. 2. Принципиальная схема способа крупномасштабного взрывания сложноструктурного участка массива горных пород: 1 — ряд одиночных скважинных зарядов; 2 — пучковый заряд в двух скважинах; 3 — пучковый заряд в трех скважинах; 4 — пучковый заряд в четырех скважинах; 5 — контурный заряд; 6 — ранее отбитая горная масса (зажим); ШВВ — штатное взрывчатое вещество; КВВ — конверсионное взрывчатое вещество; значками: v, +, o и др. обозначены типы горных пород

Технически идея многорядного крупномасштабного взрывного разрушения горных массивов сложной структуры с минимальными перемещениями (смещением) взорванной горной массы для последующей ее экскавации селективными участками реализуется порядным наращиванием условного диаметра взрывной полости путем применения пучковых зарядов различных ВВ с переменным (увеличивающимся) количеством скважин в одном пучке.

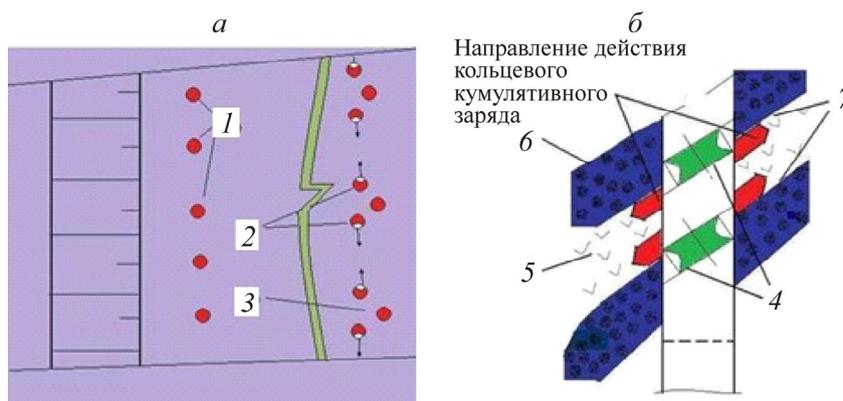


Рис. 3. Ряды одиночных обычных и сближенныхкумулятивных скважинных зарядов: а — общий вид; б —кумулятивный фрагмент заряда; 1 — ряд одиночных скважинных зарядов; 2 — ряд сближенныхкумулятивных зарядов с плоской симметрией линейной формы; 3 — встречныекумулятивные заряды с плоской симметрией; 4 —кумулятивные заряды с плоской симметрией кольцевой формы; 5 — руда; 6 — порода; 7 — граница раздела руды и пород

Увеличение количества скважин в каждом из них, начиная со второго ряда, определяется из соотношения

$$N_i = nW / l,$$

где N_i — количество скважин в групповом пучковом заряде i -го ряда, шт.; n — номер i -го ряда групповых пучковых зарядов, начиная со второго; W — линия наименьшего сопротивления скважинных зарядов первого ряда, м; l — размер свободной поверхности, приходящийся на один скважинный заряд и численно равный расстоянию между зарядами первого ряда скважин, м.

Объемную концентрацию энергии взрыва группового пучкового заряда или условного эквивалентного одинарного в i -м ряду изменяют обратно пропорционально изменению коэффициента разрыхления отбитой горной массы, определяемого по зависимости

$$M_{\text{ВВ}}^i = M_{\text{ВВ}} / k_p^i,$$

где $M_{\text{ВВ}}^i$ — объемная концентрация энергии взрывчатого вещества i -го ряда групповых пучковых зарядов, МДж/м³; $M_{\text{ВВ}}$ — объемная концентрация энергии взрывчатого вещества первого ряда групповых пучковых зарядов, МДж/м³; k_p^i — коэффициент разрыхления при взрывании i -го ряда групповых пучковых зарядов.

В соседних групповых пучковых зарядах в ряду и между ними устанавливают кумулятивные заряды с плоской симметрией линейной формы с ориентированием оси кумулятивной выемки в направлении вертикальных или слабонаклонных структурных контактов. В центральных скважинах групповых пучковых зарядов располагают кумулятивные заряды кольцевой формы с плоской симметрией и ориентированием оси кумулятивной выемки заряда по направлениям горизонтальных или пологих контактов. Короткозамедленное взрывание зарядов, начиная со второго и последующего рядов, производят с увеличением ступени замедления каждого последующего ряда на величину не менее

$$\Delta t = W_i / c_{\text{тр}},$$

где Δt — увеличение ступени замедления, мс; W_i — линия наименьшего сопротивления группового пучкового заряда i -го ряда, м; $c_{\text{тр}}$ — скорость роста трещин в горной породе, м/с.

Скважинные заряды первого ряда взрываются последними.

Применением пучков сближенных зарядов мощных взрывчатых веществ, количество которых в каждом последующем ряду увеличивается на 1–2 начиная со второго–третьего, достигается практически неограниченная многорядность массового взрыва. В торцах скважины заряжаются конверсионными или другими мощными взрывчатыми веществами, а выше их — обычными. Комбинациями схем замедления, включая мгновенное камуфлетное взрывание, достигается необходимая степень сохранности геометрии расположения больших объемов сложно-структурного горного массива до и после крупномасштабного массового взрыва. Это позволяет добычу руды вести параллельно с выемкой пустой породы или во вторую очередь после добычи руды. Кроме того, выборочное дробление рудных и породных участков в зажиме различной степени, получение остающихся на месте взрыва больших объемов не перемешанной взрывом горной массы создают условия для долговременной и стабильной селективной экскаваторной разборки сложно-структурного забоя. Сокращается количество массовых взрывов и перемещений погрузочно-транспортной техники, что увеличивает эффективность применения новой технологии.

При добыче полезных ископаемых с применением взрывных работ, в том числе с управляемым действием крупномасштабного взрыва, в первую очередь должны быть решены вопросы о достижении рациональной степени дробления разрушаемой среды и сохранении устойчивости массива при различных горнотехнических условиях и системах разработки. Поэтому обоснование выбора в сложных условиях одного из разномасштабных вариантов буровзрывных работ по некоторому обобщенному показателю в рамках системы разработки оказывается определяющим.

В ИПКОН РАН разработана методология, заключающаяся в обосновании физической модели интенсивной взрывной подготовки горного массива и использовании результатов теоретического рассмотрения действия взрыва при крупномасштабном взрывании на разных глубинах в зависимости от горно-геологических условий [9].

Идея модели, состоящей из двух частей — структуры (алгоритма) и лабораторной части, заключается в получении результата в виде новой, интегральной характеристики взрывного разрушения массивов горных пород, учитывающей факторы геологические, геомеханические,

технологические и связанные непосредственно с действием взрыва заряда ВВ и его конструкцией. Тип масштабности взрывной отбойки отражает комплексное влияние условий взрывных работ с глубиной разработки, что и позволяет характеризовать его как интегральный.

На выходе модели определяются критериальные типы (оптимально три) масштабности отбойки, обобщенные по методам и параметрам буровзрывных работ с совокупным учетом основных характеристик и показателей взрывных работ в каждом. Дана классификация взрывной отбойки по выбору ее вида в различных условиях, отражающая результаты рассмотренных теоретических предпосылок и обоснований различных факторов взрывной отбойки массивов горных пород. Дальнейшее сводится к привязке вариантов к конкретным горнотехническим условиям при разработке инновационной геотехнологии [10].

ВЫВОДЫ

В работе представлены теоретические предпосылки действия взрыва при крупномасштабном взрывании в сложных горно-геологических условиях, включая селективную отбойку.

Рассмотрена идея использования направленного действия энергии взрыва, открывающая совершенно новые возможности по управлению процессами передачи и распределения энергии взрыва в разрушаемом массиве и заключающаяся в применении сближенных зарядов различной формы, эквивалентных по энергии одному заряду.

Реализован эффект образования заряда и волны некруговой, практически любой по необходимости формы, что само по себе знаменует новое явление в горной практике, базирующейся на одинарных скважинных зарядах круглой в сечении формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов С. Д., Еременко А. А., Закалинский В. М., Машуков И. В.** Технология крупномасштабной взрывной отбойки на удароопасных рудных месторождениях Сибири. — Новосибирск: Наука, 2005.
2. **Викторов С. Д., Галченко Ю. П., Закалинский В. М., Рубцов С. К.** Разрушение горных пород сближенными зарядами / под ред. акад. К. Н. Трубецкого. — М.: Научтехлитиздат, 2006.
3. **Лаврентьев М. А.** Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. — 1957. — Т. 12. — Вып. 4.
4. **Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Закалинский В. М.** О новом направлении в развитии буровзрывного комплекса на открытых горных работах // Перспективы освоения недр — комплексное решение актуальных проблем: научные чтения им. Н. В. Мельникова / под ред. акад. К. Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН, 2002.
5. **Еременко А. А.** Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири. — Новосибирск: Наука, 2013.
6. **Галченко Ю. П.** Об эффекте кумуляции при разрушении горных пород децентрированными зарядами // Зап. Горного института. — 2007. — Т. 171.
7. **Будько А. В., Закалинский В. М.** К теории действия взрыва сближенных скважин // ФТПРПИ. — 1965. — № 6.
8. **Пат. 2511330 РФ.** Способ крупномасштабного взрывного разрушения горных массивов сложной структуры для селективной выемки полезного ископаемого на открытых работах / С. Д. Викторов, А. Е. Франтов, В. М. Закалинский, Ю. П. Галченко // Оpubл. в БИ 10.04.2014. — № 10.
9. **Viktorov S. D., Zakalinsky V. M., Osokin A. A., and Shlapin A. V.** Physical model of mineral block intensive development by blasting with an energy- and resource-saving geotechnology at great depths, 7-th World Conference on Explosives and Blasting, 2013, p. 2.
10. **Ракишев Б. Р.** Вскрытие карьерных полей и системы открытой разработки. — Алматы: МОиН РК, 2013.

Поступила в редакцию 23/IX 2014