

М.В. Лизункин, В.Н. Тюпин, В.М. Лизункин

**УСТАНОВЛЕНИЕ РАДИУСА ЗОНЫ ДРОБЛЕНИЯ
ТРЕЩИНОВАТОГО НАПРЯЖЕННОГО
ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ВЗРЫВЕ ДВУХ
ПАРАЛЛЕЛЬНО СБЛИЖЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ***

Анализ технической литературы показал, что при взрывании параллельно сближенных зарядов ВВ отсутствуют математические формулы для определения радиусов разрушения напряженного трещиноватого массива, который определяет важнейший параметр – линию наименьшего сопротивления. На основе энергетической теории деформирования и разрушения трещиноватого горного массива взрывом решена классическая задача взаимодействия волн деформаций от двух одновременно взрывааемых зарядов ВВ. Согласно этой теории разрушающие волны напряжения теряют основную часть энергии на ближайших к зарядам естественных трещинах, и разрушение удаленных отдельных происходит в результате их деформирования и разрушения под действием продуктов детонации. Иными словами, в массиве распространяется волна деформаций от заряда, которая представляет собой последовательное смещение отдельных, сопровождающееся неупругим деформированием массива на гранях естественных отдельных с их упругими деформациями и разрушением. Практика показала, что классическое решение при определении линии наименьшего сопротивления занижает эту величину. Решена другая теоретическая задача с учетом эффекта упругой реакции массива в результате его сжатия между двумя взрываемыми скважинами. Учет эффекта упругой реакции дает возможность увеличивать ЛНС при тех же результатах взрыва. Даны численные значения радиусов зон разрушения массивов при различных вариантах расчета, доказывающие необходимость учета эффекта упругой реакции массива.

Ключевые слова: параллельно сближенные заряды ВВ, радиус зоны дробления, трещиноватый напряженный массив, эффект упругой реакции массива, линия наименьшего сопротивления, теоретические формулы, достоверность формул.

Введение

При физико-технических и физико-химических геотехнологиях, когда разрушение руды производится буровзрывным способом с использованием параллельно сближенных шпуровых или скважинных зарядов, предъявляются особые требования к качеству руды (заданная кусковатость, минимум разубоживания от прихвата вмещающих пород и др.). Важнейшей задачей является определение таких параметров расположения скважинных или шпуровых зарядов ВВ, которые обеспечат необходимые размеры и форму зоны дробления [1].

Исследования взаимодействия зарядов ВВ в однородных средах носят в основном экспериментальный характер [2, 3, 4].

Существуют теоретические исследования дробления однородного массива горных пород взрывом, которые позволили установить некоторые закономерности взаимодействия зарядов ВВ [3, 5]:

* Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание комплексной технологии отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами» при финансовой поддержке Правительства РФ (Минобрнауки России).

- сжимающие напряжения на линии, соединяющей заряды ВВ, в центре между зарядами удваиваются;
- при пересечении радиусов-векторов от двух зарядов ВВ под углом 90° , в точке встречи возникают изотропные области, в которых сжимающие и растягивающие напряжения компенсируются;
- напряжения в массиве, возникающие от взрыва двух зарядов, складываются согласно законам векторной алгебры.

Вопросы взаимодействия не сближенных зарядов ВВ при взрывании в реальном трещиноватом массиве, определение размеров и формы зоны дробления наиболее подробно рассмотрены в работе [6].

Однако в перечисленных научных работах отсутствуют теоретическое обоснование и математические расчетные формулы для определения радиуса зоны дробления трещиноватого напряженного горного массива при взрыве параллельно сближенных зарядов ВВ.

В настоящей статье теоретически определяются форма и размеры зоны дробления при одновременном взрывании двух параллельно-сближенных зарядов ВВ в полубезграничном трещиноватом массиве горных пород.

Общие положения

Рассмотрим действие взрыва двух удлиненных цилиндрических зарядов ВВ (рис. 1) перпендикулярно линии, соединяющей их оси в центральной части.

Характерными геометрическими элементами зоны взаимодействия, расположенной между зарядами, являются линия (или плоскость), соединяющая заряды ВВ и ее длина a , линия (или плоскость) взаимодействия зарядов ВВ (OO'), которая перпендикулярна линии зарядов для массива с хаотической трещиноватостью (при количестве систем трещин не менее 4), а также с системами трещиноватости, расположенными симметрично относительно линии зарядов. Векторы напряжений от двух зарядов ВВ встречаются в плоскости взаимодействия (OO'). Характерными элементами являются углы между линией взаимодействия и векторами напряжений от зарядов ВВ (α и β).

Общая схема разрушения трещиноватого массива в зоне взаимодействия представляется на основе энергетической теории деформирования и разрушения трещиноватого массива [6]. Согласно этой теории разрушающие волны напряжения теряют основную часть энергии на ближайших к зарядам естественных трещинах, и разрушение удаленных отдельных происходит в результате их деформирования под действием продуктов детонации (ГД). Иными словами, в массиве распространяется волна деформаций от заряда, которая представляет собой последовательное смещение отдельных, сопровождающееся неупругим дефор-

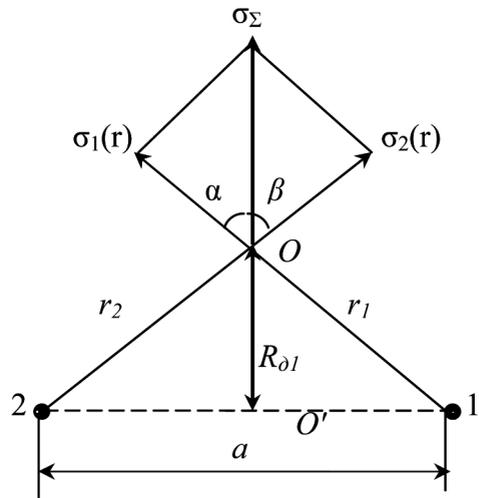


Рис. 1. Схема распределения напряжений перпендикулярно линии, соединяющей два параллельно сближенных заряда ВВ: 1, 2 – заряды ВВ

мированием массива на берегах естественных трещин и упругими деформациями и разрушением отдельных частей [6].

Эта схематизация основывается на следующих положениях и экспериментальных фактах. Известно, что трещина с шириной раскрытия более 2 мм, находящаяся вблизи заряда снижает напряжение на фронте волны в 25 раз [7] или полностью гасит ее [8]. Минимальное раскрытие трещин в массиве при ведении подземных работ составляет около 0,2–0,5 мм [10], то есть часть энергии волны проходит через такие трещины.

Оценим величину напряжения на фронте волны с удалением ее от заряда. На расстоянии около $(2...3)d_3$ (d_3 – диаметр заряда ВВ) от заряда находится дальняя граница зоны мелкого дробления, которая характеризуется тем, что напряжение на фронте волны равно пределу прочности породы на сжатие, равному около 10^8 Па. Это напряжение продолжает уменьшаться с распространением волны за счет геометрического расхождения и диссипации энергии на деформирование монолитной отдельности массива. Пусть даже при подходе волны к естественной трещине напряжение равно 10^8 Па и предположим, что оно уменьшается при переходе через трещину не в 25 раз, а в 2,5 раза, то есть пропорционально отношению величин раскрытия трещин. Тогда максимально возможное сжимающее напряжение в соседней отдельности будет равно $4 \cdot 10^7$ Па. Растягивающее напряжение, определяемое через соотношение коэффициента Пуассона, в среднем равно 10^7 Па, что соответствует среднему пределу прочности на растяжение образца горной породы. Таким образом, соседняя с зарядом отдельность может быть раздроблена волной напряжения. Однако при расстоянии между трещинами не более 0,5 м, количество трещин, встречающихся на пути распространения волны, будет составлять более 2–3. Поэтому можно считать, что разрушение на дальней границе зоны дробления будет определяться процессом деформирования и разрушения трещиноватого массива под действием квазистатического давления ПД [9]. Это предположение усиливается тем, что при нарушении трещиноватого массива предыдущими взрывами, ширина раскрытия трещин часто превышает величину 0,2–0,5 мм.

Результирующее напряжение, возникающее от взрыва двух зарядов в любой точке по линии взаимодействия согласно построениям (рис. 1), будет равно

$$\sigma_{\Sigma} = \left[\sigma_1^2(r) + \sigma_2^2(r) + 2\sigma_1(r)\sigma_2(r)\cos(\alpha + \beta) \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где $\sigma_1(r)$, $\sigma_2(r)$ – сжимающие или растягивающие напряжения от взрыва первого и второго зарядов ВВ; α , β – углы между действующим и результирующим напряжением (рис. 1).

Для массивов горных пород с хаотической или симметрично расположенной трещиноватостью относительно линий действия напряжений, а также при одинаковых геометрических параметрах зарядов ВВ и их детонационных характеристиках принято условие

$$\sigma_1(r) = \sigma_2(r); \alpha = \beta. \quad (2)$$

Подставляя условия (2) в (1) и решая установленное в конечном итоге квадратное уравнение, получим радиус зоны дробления R_d перпендикулярно линии зарядов, равный

$$R_d = R_1 + \sqrt{R_1^2 - 0,25a^2}, \quad (3)$$

где R_1 – радиус зоны дробления трещиноватого напряженного горного массива взрывом одиночного заряда ВВ [6].

$$R_1 = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_B d_3 c v \left(1 - \frac{\mu v}{1 - v}\right)}{8 (\sigma_p + \mu P) \Phi (1 - v)} \sqrt{\frac{2d_k}{d_e}} \quad (4)$$

где D , ρ_B , d_3 – соответственно скорость детонации, плотность ВВ, диаметр заряда ВВ; c , v , σ_p – соответственно скорость продольной волны, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв отдельности; μ , Φ , d_e – соответственно коэффициент трения между отдельностями, показатель трещиноватости массива, размер отдельности; d_k – размер кондиционного куска; P – величина горного давления.

Формула (3) применима при взрывании двух параллельно сближенных зарядов ВВ, то есть при $a \leq 2R_1$. Формула достоверна, так как при $a = 0$, $R_{д1} = 2R_1$, при $a = 2R_1$, $R_{д1} = R_1$.

Однако опытно-промышленные работы на Бом-Горхонском руднике ООО «Старательская артель «Кварц» и рудниках ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО») показали, что линия наименьшего сопротивления (ЛНС), выбираемая в соответствии с (3), оказывается заниженной. Увеличение ЛНС на рудниках ПАО «ППГХО» с 1,2...1,4 м (расстояние между скважинами в ряду 1,0...1,3 м, диаметр скважин 65 мм) до 1,5...1,7 м (расстояние между сближенными зарядами 0,6...0,8 м) приводит к идентичным по дроблению результатам. На Бом-Горхонском руднике переход с ЛНС 0,6...0,7 м (расстояние между шпурами 0,55 м, диаметр шпуров 42 мм) на ЛНС 1,1...1,2 м (расстояние между сближенными шпурами 0,3...0,4 м) также привело к практически идентичным по качеству дробления результатам [11]. Аналогичные результаты имели место при отбойке и разрушении с бóльшими параметрами [12].

Эти факты навели на мысль, что при сближении зарядов появляется некий дополнительный эффект, который усиливает действие взрыва. Сделано предположение, что при сближении зарядов ВВ между ними по линии OO' (рис. 1) возникает зона, где горная порода сжимается от действия ПД радиальными напряжениями (рис. 2).

При этом радиальные напряжения преобразуются в тангенциальные через соотношение коэффициента Пуассона и дополнительно воздействуют на окружающий массив, увеличивая радиус зоны его разрушения по линии ЛНС. Расположение радиальных и тангенциальных напряжений и результирующего их действия приведено на рис. 2.

Суммарное напряжение согласно векторным построениям на рис. 2 и исследованиям, приведенным выше, равно

$$\sigma_z(W) = 2\sigma(r_1) \cos \alpha + 2\sigma(r_1) \frac{v}{1 - v} \cos(90 - \alpha), \quad (5)$$

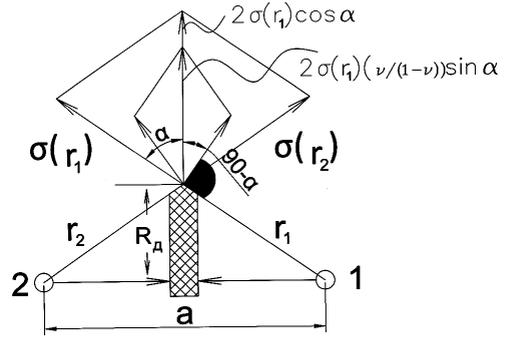


Рис. 2. Схема распределения напряжений при взрыве параллельно сближенных зарядов ВВ с учетом эффекта упругой реакции массива: 1, 2 – заряды ВВ

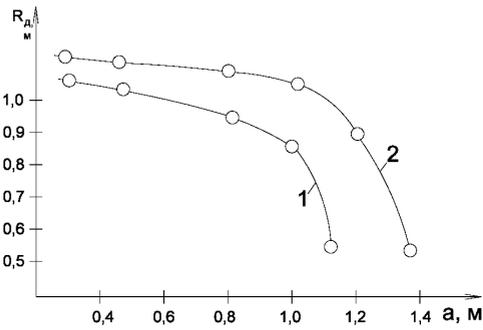


Рис. 3. Зависимость радиуса зоны дробления (R_d) от расстояния между скважинами (a) при: классической схеме расчета (1), теоретическом расчете с учетом эффекта упругой реакции массива (2)

Зависимость (6) имеет смысл при $a < 2,8R_1$, то есть для двух параллельно сближенных зарядов ВВ.

Проведем численный анализ зависимостей (3) и (6) для реальных условий блока 4Д-809 подземного уранового рудника № 1 ПАО «ППГХО» при подэтажной отбойке крутопадающего рудного тела мощностью 1,0...2,5 м.

Вмещающие породы: трахидацинты с $d_e = 0,15-0,3$ м (среднее значение 0,225 м), $c = 4,35 \cdot 10^3$ м/с, $\nu = 0,29$, $\sigma_p = 1,39 \cdot 10^7$ Па, $\Phi = 10$, $\mu = 0,3$, P на глубине 400 м равно $9,8 \cdot 10^6$ Па, $d_k = 0,3$ м. При взрывании применяли граммонт М-21 с $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_B = 10^3$ кг/м³, диаметр скважин $d_s = 0,065$ м. Численные расчеты дают $R_1 = 0,55$ м.

Численные расчеты по формулам (3) и (6) при изменении расстояния между скважинами a от 0,3 до 1,5 м представлены на рис. 3

Анализ рис. 3 показывает, что учет эффекта упругой реакции области массива между зарядами ВВ приводит к увеличению зоны дробления на 20–30% по сравнению с классическим расчетом (формула 3).

Полученные данные можно использовать для расчета параметров БВР при подготовке маломощных рудных тел к подземному выщелачиванию, подэтажной взрывной отбойке и селективной выемке руд из пологих залежей.

Заключение

В настоящей статье проанализированы литературные источники по вопросам учета эффекта взаимодействия зарядов ВВ. На основе энергетической теории деформирования и разрушения трещиноватого горного массива взрывом решена классическая задача взаимодействия волн деформаций от двух одновременно взрывааемых зарядов ВВ. Практика показала, что классическое решение при определении ЛНС занижает эту величину. Решена другая теоретическая задача с учетом эффекта упругой реакции массива в результате его сжатия между двумя взрывааемыми параллельно сближенными зарядами. Упругая реакция массива от действия параллельно сближенных зарядов приводит к возможности увеличения ЛНС при тех же результатах взрыва. Даны численные значения радиусов зон разрушения массивов при различных вариантах расчета, доказывающие необходимость учета эффекта упругой реакции массива.

где первый член правой части (5) отражает суммарное радиальное напряжение от взрыва двух зарядов ВВ, второй член – суммарное тангенциальное напряжение.

Подставляя в (5) логичные соотношения:

$$\sigma(r_1) = R_1 (\sigma_p + \mu P) r_1^{-1};$$

$$r_1 = (R_d^2 + 0,25a^2)^{-0,5};$$

$$\cos(90 - \alpha) = \sin \alpha;$$

$\sin \alpha = 0,5a(R_d^2 + 0,25a^2)^{-0,5}$ и решая установленное квадратное уравнение, получим

$$R_d = R_1 + (R_1^2 + R_1 \frac{av}{1 - \nu} - 0,25a^2)^{0,5} \quad (6)$$

1. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 191 с.
2. Филиппов В.А., Алиев Д.Х. Разрушение крепких горных пород при взаимодействии зарядов / Взрывное дело, № 78/35. – М.: Недра, 1977. – С. 74–80.
3. Будько А.В., Закалинский В.М., Рубцов С.К., Блинов А.А. Совершенствование скважинной отбойки. – М.: Недра, 1981. – 199 с.
4. Ханукаев А.Н., Кусов Н.Ф., Пшеничный В.И. и др. Снижение напряженности горного массива с помощью взрывов. – М.: Наука, 1979. – С. 107–110.
5. Кучерявый Ф.И. Напряжения в массиве вокруг изотропной точки при одновременном взрыве двух скважинных зарядов / Взрывное дело, № 53/10. – М.: Недра, 1963. – С. 112–117.
6. Тюпин В.Н. Повышение эффективности геотехнологии с использованием энергии взрыва при деформировании напряженных трещиноватых массивов горных пород. – Дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук. – М.: ВНИПИПромтехнологии, 2002. – 267 с.
7. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 222 с.
8. Сеинов Н.П., Чевкин А.И. О влиянии раскрытости трещин в среде на разрушение ее взрывом // ФТПРПИ. – 1968. – № 3. – С. 57–64.
9. Кутузов Б.Н., Тюпин В.Н. Определение размера зоны регулируемого дробления при взрыве заряда в трещиноватом массиве // Известия вузов. Горный журнал. – 1974. – № 8. – С. 30–35.
10. Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975. – С. 121–191.
11. Лизункин В.М., Галченко Ю.П., Лизункин М.В., Ситников Р.В. Результаты опытно-промышленных испытаний отбойки руды децентрализованными зарядами ВВ на Бом-Горхонском вольфрамовом месторождении / Кулагинские чтения: X Всероссийская научно-практическая конференция. Ч. 1. – Чита: ЧитГУ, 2010. – С. 61–64.
12. Викторов С.Д., Галченко Ю.П., Закалинский В.М., Рубцов С.К. Разрушение горных пород сближенными зарядами / Экспериментальная проверка новой концепции развития взрывной отбойки на подземных горных работах. – М., 2006. – С. 177–178. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Лизункин Михаил Владимирович*¹ – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: LMV1972@mail.ru,
Тюпин Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта, филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: tyupinv@mail.ru,
*Лизункин Владимир Михайлович*¹ – доктор технических наук, профессор,
e-mail: prmpi.zabgu@mail.ru,
¹ Забайкальский государственный университет.

UDC 622.235:622.274.36.063.23

THE ESTABLISHMENT OF THE CRUSHING AREA RADIUS OF FRACTURED STRAINED MASSIF DESTRUCTION DURING EXPLOSION OF TWO PARALLEL CONTIGUOUS CHARGES OF BLASTING COMPOUNDS

*Lizunkin M.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: LMV1972@mail.ru,
Tyupin V.N., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Transbaikalian Railway Transport Institute, a branch of Irkutsk State Railway
Transport Engineering University, 672040, Chita, Russia,
e-mail: tyupinv@mail.ru,
*Lizunkin V.M.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: prmpi.zabgu@mail.ru,
¹ Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.

Analysis of technical literature has shown that during explosion of parallel-contiguous charges of blasting compounds mathematical formulas for determination radius of destruction of fractured massif that defines the most important parameter- the line of the least resistance are absent.

On the basis of energy theory of deformation and destruction of fractured rock massif by explosion we solved a classic problem of interaction of deformation waves from two charges of blasting compounds exploded simultaneously. According to this theory destructive waves of voltage lose the main part of energy on the nearest to charges natural flaws and the destruction of outlying joints occurs as a result of deformation and fracture by the action of detonation products. In other words, the wave of charge deformation, that is posed as successive displacements of joints followed by inelastic deformation of array on the natural joint's edges together with its elastic strains and deformation, spreads in the massif.

Practice has shown that classical solution during determining the line of the least resistance underestimates this value. Another theoretical problem is solved taking into account effect of massif elastic response as a result of its pressure between two blasting holes. Accounting for the elastic reaction effect makes it possible to increase the line of least resistance at the same results of explosion. We gave the numeral values of massif's crushing area radius with different variants of the calculation, which prove the need to consider the effect of elastic massif reaction.

Key words: parallel-contiguous charges of blasting compounds, radius of crushing area, fractured strained massif, effect of elastic massif reaction, line of the least resistance, theoretical formulas, accuracy of formulas.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out in the framework of the integrated high-technology production project "Development of Integrated Technology for Mining Low-Economic Uranium Ore using Geotechnological Methods under financial support by the Government of the Russian Federation (RF Ministry of Education and Science).

REFERENCES

1. Mosinets V.N., Abramov A.V. *Razrushenie treshchinovatykh i narushennykh gornyykh porod* (Destruction of fractured and broken rocks), Moscow, Nedra, 1982, 191 p.
2. Filippov V.A., Aliev D.Kh. *Vzryvnoe delo, no 78/35* (Blasting work, no 78/35), Moscow, Nedra, 1977, pp. 74–80.
3. Bud'ko A.V., Zakalinskiy V.M., Rubtsov S.K., Blinov A.A. *Sovershenstvovanie skvazhinnoy otбойki* (Improving the longhole stoping), Moscow, Nedra, 1981, 199 p.
4. Khanukaev A.N., Kusov N.F., Pshenichnyy V.I. *Snizhenie napryazhennosti gornogo massiva s pomoshch'yu vzryvov* (Reduce of massif tension using blasting work), Moscow, Nauka, 1979, pp. 107–110.
5. Kucheryavyi F.I. *Vzryvnoe delo, no 53/10* (Blasting work, no 53/10), Moscow, Nedra, 1963, pp. 112–117.
6. Tyupin V.N. *Povyshenie effektivnosti geotekhnologii s ispol'zovaniem energii vzryva pri deformirovani napryazhennykh treshchinovatykh massivov gornyykh porod* (The increase of geotechnological efficiency by using explosion energy during deformation of strained fractured massifs of mineral resources), Doctor's thesis, Moscow, VNIPIpromtekhologii, 2002, 267 p.
7. Khanukaev A.N. *Fizicheskie protsessy pri otboyye gornyykh porod vzryvom* (Physical processes during mineral explosive fracture), Moscow, Nedra, 1974, 222 p.
8. Seinov N.P., Chevkin A.I. *Fiziko-tekhicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1968, no 3, pp. 57–64.
9. Kutuzov B.N., Tyupin V.N. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1974, no 8, pp. 30–35.
10. Ruppeneyt K.V. *Deformiruemost' massivov treshchinovatykh gornyykh porod* (The deformability of fractured rock massif), Moscow, Nedra, 1975, pp. 121–191.
11. Lizunkin V.M., Galchenko Yu.P., Lizunkin M.V., Sitnikov R.V. *Kulaginskie chteniya: X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*, ch. 1 (Kulagin's readings: X Russian scientific and practical conference, part 1), Chita, ChitGU, 2010, pp. 61–64.
12. Viktorov S.D., Galchenko Yu.P., Zakalinskiy V.M., Rubtsov S.K. *Ekspperimental'naya proverka novoy konseptsii razvitiya vzryvnoy otбойki na podzemnykh gornyykh rabotakh* (Experimental verification of a new concept of development blasting in underground mining), Moscow, 2006, pp. 177–178.

