

УДК 622.831

**ВЗРЫВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. Н. Тюпин, Т. И. Рубашкина

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: tyupinvn@mail.ru, ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия*

Обосновываются методы определения напряженного состояния массива горных пород с использованием энергии взрыва. Проведены промышленные экспериментальные исследования по определению размеров зон раздавливания и радиального трещинообразования на рудниках ПАО “Приаргунское производственное горно-химическое объединение”. Установлено, что с глубиной разработки радиус зоны трещинообразования снижается, диаметр зоны раздавливания увеличивается. Получены теоретические формулы расчета напряжений в горном массиве в зависимости от размеров зон раздавливания и радиального трещинообразования, физико-технических свойств горных массивов и детонационных характеристик ВВ. Их достоверность доказана сравнением с данными метода параллельных скважин, полученными на месторождении “Антей” ПАО “ППГХО”. Взрывные методы определения напряжений в массиве можно оперативно применять в процессе проходки горных выработок.

Горный массив, напряженное состояние, энергия взрыва, зона раздавливания, зона радиальных трещин, физико-технические свойства, формулы для определения напряжений, достоверность

DOI: 10.15372/FTPRPI20180406

Выбор способов и параметров подземной разработки месторождений полезных ископаемых обусловлен многими факторами: физико-техническими свойствами горных пород, структурным строением и параметрами трещиноватости массива горных пород, а также его напряженно-деформированным состоянием. Напряженное состояние горных массивов определяется теоретическими и экспериментальными методами. Теоретические методы начали развиваться в начале XX в. и продолжают совершенствоваться в настоящее время [1–9].

Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния горного массива интенсивно разрабатывались во второй половине XX в. Они получили широкое распространение и наиболее подробно описаны в [10–12]. Сюда относятся метод разгрузки, построенный на использовании упругого расширения элемента массива при его отделении от массива, например выбуривании керна; метод компенсационных нагрузок, основанный на восстановлении упругой деформации частично разгружаемого массива при его повторном нагружении; метод разности давлений — на помещении в скважине гидравлических баллонов, фиксирующих изменение давления в баллоне со временем. В методе упругих включений измерения проводят путем помещения фотоупругих датчиков в скважину. Метод буровых скважин

основан на измерении деформаций стенок скважин в поперечном и продольном направлении. Метод параллельных скважин заключается в том, что параллельно первой скважине, в которой находятся датчики, бурят вторую. Затем вычисляют величину напряжений. Метод дискования керна позволяет рассчитать степень удароопасности горного массива.

Для определения значений напряжений в горном массиве используются методы акустической эмиссии, ультразвуковой, электрометрические методы, основанные на получении тарировочных зависимостей при испытании образцов пород в лабораториях и замеров соответствующих показателей в массивах горных пород. Перечисленные методы требуют соответствующего дорогостоящего оборудования, а также больших затрат времени.

В [13] предложен метод оценки напряжения в массиве при динамическом разрушении горных выработок в бортах или кровле из соотношения

$$P = 0.7\sigma_c, \quad (1)$$

где σ_c — предел прочности горных пород на одноосное сжатие, МПа.

Величину максимальных нормальных напряжений рассчитывают по деформированию стенок в скважине по формуле

$$P = 0.85\sigma_c \left(3.85 \frac{d_2}{d_1} - 0.5 \right), \quad (2)$$

здесь d_1 , d_2 — диаметр скважины и диаметр скважины, измеренный через определенное время, мм.

Данные методы применимы, как правило, в удароопасных массивах и, если напряженное состояние массива незначительно (нет разрушений обнажений выработок или деформации стенок скважин), то определить напряжение невозможно.

В настоящей работе предлагается оперативный метод определения величины горного давления с использованием энергии взрыва.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для обоснования взрывного метода определения величины напряжения в горном массиве проведена серия промышленных экспериментальных и теоретических исследований [14]. Идея предлагаемых методов заключается в том, что при взрыве заряда ВВ в шпуре (скважине) в очень короткий промежуток времени возникает давление, величина которого задается в основном скоростью детонации ВВ и плотностью заряжения. Давление в шпуре создает в горном массиве, на контакте с ВВ, зону раздавливания, где порода разрушается на мелкие куски. Далее находится зона радиального трещинообразования, где в направлении от центра заряда ВВ распространяются радиальные трещины [15] (рис. 1). Наиболее постоянное давление от взрыва формируется вблизи забоя взрываемого шпура.

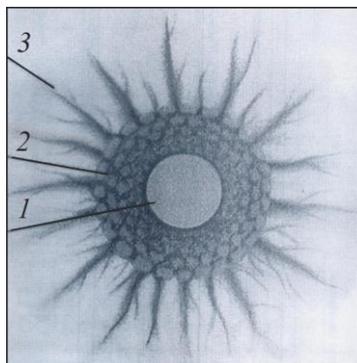


Рис. 1. Схема взрывного разрушения массива горных пород: 1 — полость взрыва; 2 — зона раздавливания; 3 — зона радиальных трещин

Экспериментальные исследования по изучению характера действия взрыва проводились при проходке горных выработок на рудниках ПАО “Приаргунское производственное горно-химическое объединение” (ППГХО). На рудниках “Центральный”, “Восточный”, “Глубокий”, № 2, 4, 6, 8 использовались рабочие забои горноразведочных, проходческих выработок и очистных заходов на глубине 180–600 м. В массивах гранитов, трахидацитов, фельзитов, конгломератов и андезито-базальтов после проходческого цикла на поверхности образованного забоя определялись размеры зон действия взрывов: диаметр зоны раздавливания (“стакана”), радиус зоны радиального трещинообразования, количество радиальных трещин вокруг шпура. Кроме того, анализировался гранулометрический состав разрушенных пород в “стакане”. Его длина составляла от 0.1 до 0.3 м. Параметры буровзрывных работ: ВВ — аммонит 6ЖВ диаметром 32 мм, диаметр шпура 40 мм, длина шпура 1.8 м. Всего осуществлено более 200 замеров во врубовых шпурах. Результаты замеров приведены в таблице.

Исследования по определению диаметра “стаканов” D_c и радиусов зон радиального трещинообразования R_t выполнены в массивах трахидацитов с глубиной разработки. Массив трахидацитов обладает минимальной вариацией физико-технических свойств образцов пород и выдержанностью естественной трещиноватости. Глубина разработки составляла 180, 340, 420 и 600 м, число шпуров — более 100. Результаты исследований приведены на рис. 2 в виде экспериментальных зависимостей диаметра зоны раздавливания и радиуса зоны трещинообразования с глубиной разработки.

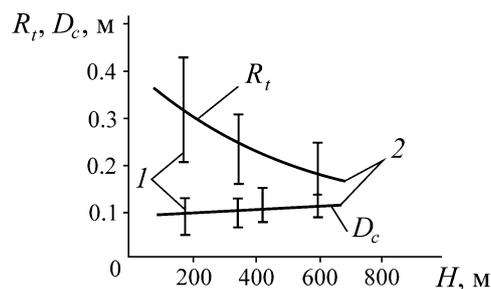


Рис. 2. Зависимость радиуса зоны трещинообразования R_t и диаметра зоны раздавливания — “стакана” — D_c от взрыва с глубиной разработки H в массиве трахидацитов: 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные

Анализ зависимостей показывает, что с глубиной разработки радиус зоны трещинообразования уменьшается, а диаметр зоны раздавливания увеличивается. Экспериментальные данные таблицы демонстрируют зависимость между числом трещин и коэффициентом Пуассона в виде $N = \nu^{-2}$. При этом четкой зависимости между длиной радиальных трещин и их числом не установлено. Это связано с тем, что разные породы (граниты, трахидациты, конгломераты, фельзиты, андезито-базальты) обладают различными физико-механическими свойствами и замеры выполнялись на различной глубине от поверхности земли.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПО ДЛИНЕ РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН

Результаты экспериментальных исследований свидетельствует о том, что с ростом напряженного состояния массива (с глубиной) радиус зоны раздавливания, находящейся вблизи заряда ВВ, увеличивается, т. е. естественное напряженное состояние в глубине массива суммируется с напряжением от взрыва заряда ВВ. При этом радиус зоны радиального трещинообразования с увеличением горного давления уменьшается, поскольку горное давление препятствует прорастанию радиальных трещин.

Экспериментальные параметры размеров зон раздавливания D_c , трещинообразования R_r и числа радиальных трещин N при взрыве шпуровых зарядов ВВ

Горная порода и глубина от поверхности земли	Размер отдельности, м	Усредненные физические свойства				D_c , м	R_r , м	N	Число замеренных шпуров
		ν	σ_c , МПа	σ_s , МПа	c , 10^3 м/с				
Граниты (рудник "Восточный", 8, 6), $H = 450 - 600$ м	0.15 – 1.00	0.23	144.0	8.6	4.54	0.05 – 0.20 (1.2 – 5.0)	0.1 – 0.3 (2.5 – 7.5)	20 – 50	30
Трахитациты (рудники "Восточный", "Центральный", 8), $H = 180 - 600$ м	0.05 – 1.00	0.29	97.2	13.9	4.35	0.05 – 0.15 (1.2 – 3.0)	0.15 – 0.45 (3.8 – 11.3)	8 – 16	115
Конгломераты разногалечные (рудник 2, 8), $H = 180 - 240$ м	0.40 – 1.50	0.36	54.0	5.7	3.46	0.05 – 0.07 (1.2 – 1.7)	0.1 – 0.3 (2.5 – 7.5)	5 – 8	32
Андезито-базальты (рудник "Центральный")	0.15 – 0.40	0.24	102.7	11.7	4.41	0.06 – 0.08 (1.8 – 2.0)	0.1 – 0.6 (2.5 – 15.0)	16 – 24	9
Фельзиты столбчатые (рудник 4), $H = 120 - 180$ м	0.15 – 0.40	0.30	69.5	12.4	3.65	0.05 – 0.07 (1.2 – 1.7)	0.2 – 0.4 (5.0 – 10.0)	10 – 15	27

Примечание. В скобках указаны диаметры шпура; ν — коэффициент Пуассона; σ_c , σ_s — пределы прочности на сжатие и растяжение; c — скорость продольной волны в образцах горной породы, численные значения взяты из [14]

Теоретические исследования в [14] дают формулу для определения радиуса зоны радиального трещинообразования при взрывании цилиндрического заряда ВВ в массиве:

$$R_t = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_1 d_0 c \nu}{(\sigma_s + P)\Phi(1-\nu)}, \quad (3)$$

где D, ρ_1, d_0 — скорость детонации, плотность заряжения, диаметр заряда ВВ; c, ν, σ_s — скорость продольной волны, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв горной породы массива; Φ — показатель трещиноватости горного массива; P — напряжение в массиве.

Величина напряжения в горном массиве получена из (3) и имеет вид

$$P = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_1 d_0 c \nu}{R_t \Phi(1-\nu)} - \sigma_s. \quad (4)$$

Проведем численные расчеты горного давления по формуле (4) в массиве гранитов при $\pi = 3.14$; $D = 4.2 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_1 = 0.8 \cdot 10^3$ кг/м³; $d_0 = 0.04$ м; $c = 4.54 \cdot 10^3$ м/с; $\nu = 0.23$; $\Phi = 6$, $R_t = 0.1 - 0.3$ м; $\sigma_s = 8.6 \cdot 10^6$ Па [14] (таблица). Численные расчеты дают: при $R_t = 0.1, 0.2, 0.3$ м напряжение в горном массиве равно соответственно $P = 58.5 \cdot 10^6, 25.0 \cdot 10^6, 13.8 \cdot 10^6$ Па.

Методика измерения радиуса зоны радиальных трещин заключается в определении длины каждой трещины, отходящей от шпура, т. е. расстояния от ранее существовавшей образующей шпура до конца трещины. После этого находится среднеарифметическое значение длины трещин — это и есть радиус зоны радиального трещинообразования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПО РАЗМЕРАМ ЗОНЫ РАЗДАВЛИВАНИЯ И РАДИАЛЬНЫХ ТРЕЩИН

Анализ рис. 2 показывает, что с увеличением горного давления радиус зоны радиальных трещин уменьшается, а диаметр “стакана” увеличивается. Зная закономерности для определения размеров этих зон, можно получить формулу, не зависящую от детонационных характеристик ВВ.

Согласно [14], радиус зоны раздавливания рассчитывается по формуле

$$R_c = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_1 d_0 c}{(\sigma_c - P)\Phi} \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}, \quad (5)$$

где d_1 — максимальный размер куска породы в “стакане”; d_2 — размер естественной отдельности горного массива; σ_c — предел прочности породы на сжатие.

Сопоставляя зависимости (5) и (4), получим формулу для определения напряжения в массиве горных пород в момент взрыва врубового заряда ВВ:

$$P = \frac{\sigma_c R_c \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.5} - \sigma_s R_t (\nu^{-1} - 1)}{R_t (\nu^{-1} - 1) + R_c \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.5}}. \quad (6)$$

Численные расчеты по (6) в массиве гранитов при $\sigma_c = 144 \cdot 10^6$ Па; $R_c = 0.5D_c - 0.02 = 0.0425$ м; $d_2 = 1$ м; $d_1 = 0.02$ м; $\sigma_s = 8.6 \cdot 10^6$ Па; $R_t = 0.2$ м; $\nu = 0.23$ дают $P = 38.7 \cdot 10^6$ Па.

Для подтверждения достоверности зависимостей (4) и (6) использованы данные ИГД СО РАН, проведенные на месторождении “Антей” ПАО “ППГХО”. Напряжения в массиве гранитов определялись методом параллельных скважин. В результате исследований получены эмпирические зависимости напряжений в массиве с глубиной, приведенные в [14]:

$$P_z = 4.24 + 0.0233H, \quad P_x = 6.21 + 0.0484H, \quad P_y = 12.8 + 0.0686H, \quad (7)$$

здесь P_z, P_x, P_y — вертикальная, субширотная и субмеридиальная составляющие горного давления соответственно, МПа; H — глубина от поверхности земли, м.

Область применения зависимостей (7) — глубина 452–672 м. Численные расчеты по зависимостям (7) при $H = 600$ м дают $P_z = 18.2$ МПа, $P_x = 35.3$ МПа, $P_y = 54.0$ МПа. В среднем значение напряжений по (7) составляет 35.8 МПа.

Сравнение значений, полученных по (7), (4) $P = (13.8 - 58.5) \cdot 10^6$ Па и по (6) $P = 38.7 \cdot 10^6$ Па, свидетельствует о достоверности формул для определения напряжений в горном массиве взрывным методом в призабойной части шпура.

Основным преимуществом взрывного метода определения напряжений в горном массиве является его оперативность. После взрыва при проходке выработки на поверхности вновь образованного забоя, в районе взорванных врубовых шпуров определяют радиус зоны радиальных трещин, диаметр “стаканов” и среднее расстояние между естественными трещинами в массиве. Зная физико-механические свойства горной породы, детонационные характеристики ВВ и используя формулы (4) и (6), получают значения напряжений в горном массиве в момент взрыва на расстоянии около 1.5–2.0 м от забоя выработки (в зависимости от длины врубовых шпуров).

ВЫВОДЫ

Установлено, что с глубиной разработки радиус зоны радиальных трещин уменьшается, а диаметр зоны раздавливания (диаметр “стакана”) увеличивается. Получены формулы для расчета напряжений в горном массиве в зависимости от радиуса зоны радиальных трещин, физико-механических свойств горных пород, естественной трещиноватости массива и детонационных характеристик ВВ. Численные расчеты по этим формулам сопоставимы с данными ИГД СО РАН по замерам напряжений на месторождении “Антей” ПАО “ППГХО” методом параллельных скважин, что указывает на их достоверность.

Предложенные взрывные методы обладают оперативностью и могут служить для оценки напряжений в массиве горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А., Тапсиев А. П. Об одном методе оценки напряженного состояния массивов горных пород // ФТПРПИ. — 1992. — № 5. — С. 3–7.
2. Курленя М. В., Миренков В. Е., Шутов А. В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в зоне взаимного влияния выработок // ФТПРПИ. — 2000. — № 3. — С. 8–17.
3. Михайлов А. М. Расчет напряжения вокруг трещины // ФТПРПИ. — 2000. — № 5. — С. 36–43.
4. Айталиев Ш. М., Такишов А. А. Управление сводообразованием при камерно-столбовой системе отработки. Ч. 1. Напряженное и деформированное состояние массива // ФТПРПИ. — 2000. — № 2. — С. 5–15.

5. Бушманова О. П., Ревуженко А. Ф. Напряженное состояние породного массива вокруг выработки при локализации деформаций сдвига // ФТПРПИ. — 2002. — № 2. — С. 18–27.
6. Панфилова Д. В., Ремезов А. В. Анализ методик расчета горного давления, возникающего при ведении очистных работ // Вестн. КузГТУ. — 2005. — № 41. — С. 48–52.
7. Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спугин В. Г. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 16–24.
8. Николенко П. В., Шкуратник В. Л., Чепур М. Д., Кошелев А. Е. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 25–31.
9. Миренков В. Е. О взаимосвязи площади поперечного сечения выработки и области разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 32–38.
10. Кузнецов Г. Н., Ардашев К. А., Филатов Н. А., Амусин Б. З. Методы и средства решения задач горной геомеханики. — М.: Недра, 1987. — 248 с.
11. Витолин Е. С., Черняков А. Б., Рубан А. Д., Потапов А. М. Методы и средства контроля состояния и свойств горных пород в массиве. — М.: Недра, 1989. — 173 с.
12. Пат. РФ 2194857. Устройства для определения на месте разработки твердости или других свойств полезных ископаемых, например с целью выбора соответствующих инструментов для добычи / К. Н. Трубецкой, М. А. Иофис, Б. Н. Поставнин // Оpubл. в БИ. — 2002. — № 35.
13. Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Сер. 06. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. — Вып. 7. — 80 с.
14. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. — Белгород: ИД “Белгород”, 2017. — 192 с.
15. Суханов А. Ф., Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом. — М.: Недра, 1983. — 344 с.

Поступила в редакцию 4/III 2018