

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 дисконирования 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  $\sigma_c$  — 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.

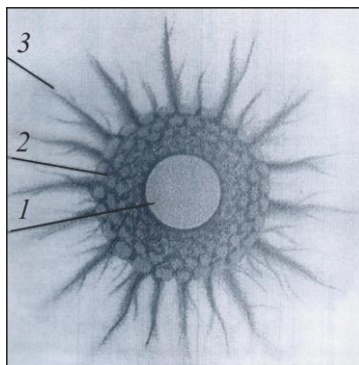


Рис. 1. Схема взрывного разрушения массива горных пород: 1 — полость взрыва; 2 — зона раздавливания; 3 — зона радиальных трещин

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.

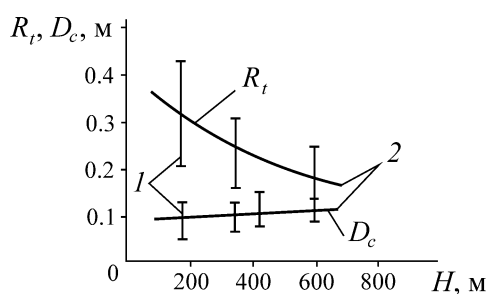


Рис. 2. Зависимость радиуса зоны трещинообразования  $R_t$  и диаметра зоны раздавливания — “стакана” —  $D_c$  от взрыва с глубиной разработки  $H$  в массиве трахидацитов: 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные

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
		$\nu$	$\sigma_c$ , МПа	$\sigma_s$ , 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 разногалеенные (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;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\sigma_c$ ,  $\sigma_s$  — 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  $D, \rho_1, d_0$  — скорость детонации, плотность заряжения, диаметр заряда ВВ;  $c, \nu, \sigma_s$  — скорость продольной волны, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв горной породы массива;  $\Phi$  — 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/м<sup>3</sup>;  $d_0 = 0.04$  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;  $\sigma_c$  — 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*