

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2022.1.6

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ЛНС ШПУРОВОГО ЗАРЯДА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА С УЧЕТОМ СТЕПЕНИ ДРОБЛЕНИЯ ВЗРЫВАЕМЫХ ПОРОД И МАССЫ ЗАРЯДА ВВ

В.В. Аникин, В.М. Мальцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрена возможность определения величины ЛНС для взрыва одиночного шпурового (удлиненного) заряда в горной породе при использовании в качестве основного фактора воздействия импульса взрыва с учетом интенсивности дробления взорванной горной массы.

Ключевые слова: паспорт БВР, удлиненный заряд, импульс взрыва, длительность импульса, радиальный зазор, динамическая разрушаемость, степень дробления, средний диаметр куска, линия наименьшего сопротивления.

Согласно п. 156 ПБ [1] паспорта БВР составляются на основании и с учетом результатов не менее трех опытных взрываний. Допускается вместо опытных взрываний использовать результаты взрывов, проведенных в аналогичных условиях.

Необходимость проведения опытных взрываний вызвана, в том числе, и определением параметров взрыва с целью получения оптимального среднего размера кусков взорванной горной массы с точки зрения технологии их дальнейшей переработки или использования.

Однако все основные классические формулы (теоретические и эмпирические) для определения ЛНС, учитывающие прочность пород или удельный расход ВВ, как правило, не позволяют напрямую контролировать степень дробления, а, следовательно, и средний размер куска взорванной горной массы.

В классических теориях взрыва основным разрушающим фактором принимается давление взрывных газов на горный массив. Так как время протекания взрыва весьма незначительно, то им обычно пренебрегают.

Вместе с тем, любое давление лишь тогда сможет разрушить объект воздействия, в данном случае горную породу, если оно воздействует на этот объект в течение определенного, пусть и очень малого по своей величине, времени, поэтому в качестве основного фактора разрушения горных пород при ведении БВР в данной работе предлагается принять импульс давления взрывных газов, образующихся при детонации шпурового заряда, который равен произведению величины давления этих газов на время его действия на взрываемый горный массив.

По своей конструкции шпуровые заряды могут быть с радиальным зазором и без зазора. Полный импульс давления взрыва при отсутствии радиального зазора определяется зависимостью (1), учитывающей основные разрушающие факторы удлиненного заряда [2]:

$$J = I \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot P_c \cdot \tau_0, \quad (1)$$

где: J – полный начальный импульс взрыва, $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$; I – коэффициент, учитывающий недозарядание шпура; d_z – диаметр заряда (равный диаметру шпура при отсутствии радиального зазора), м; L_z – длина заряда ВВ, м; P_c – среднее давление в зарядной полости с учётом отражения взрывной волны от стенок полости, Па; τ_0 – длительность начального импульса, с.

Значение коэффициента недозаряжения шпура находится по формуле:

$$I = 0,375 \cdot K_3 \cdot (1 + 2K_3) - 0,1875 \cdot (1 - K_3) \cdot (1 - K_3) \cdot (\ln \cdot (1 + K_3) - \ln \cdot (1 - K_3)), \quad (2)$$

Вместе с тем, как показывают проведенные эксперименты [3], с увеличением зазора при неизменном диаметре d_0 заряда ВВ импульс взрыва начинает расти и достигает максимального значения при радиальном зазоре $\Delta = 0,3125$, которое на расстоянии $50d_0$ может в три раза превышать величину, рассчитанную по формуле (1). При этом необходимо отметить, что при значениях $0,5 < \Delta < 0,05$ импульс перестает зависеть от зазора и определяется основными параметрами, указанными в формуле (1).

Как уже было показано в работах [4, 5], в качестве критерия разрушаемости породы для импульса взрыва может быть использован теоретический показатель динамической прочности породы:

$$I_i = f_v \frac{\rho \cdot C}{\rho_v \cdot D} \cdot \frac{\sigma \cdot \tau_0}{i_0^2} \cdot \frac{1 - \mu}{1 + \mu}, \quad (3)$$

где: I_i – теоретический расчётный показатель динамической разрушаемости породы, Па·с; f_v – эмпирический коэффициент, зависящий от типа ВВ, для аммонита БЖВ $f_v = 1$; σ – прочность породы на одноосное сжатие, Па; μ – коэффициент Пуассона; i_0 – степень дробления породных образцов, обеспечивающая их устойчивое разрушение при данном виде нагружения; C – скорость распространения продольной волны (звука) в породе, м/с; D – скорость детонации ВВ заряда, м/с; ρ_v – плотность ВВ, кг/м³.

Величина степени дробления при ударном разрушении образца составляет $i_0 = 1,36$, и образец при этом значении теоретически раскалывается на два приблизительно равных по своей величине крупных куски и более мелкие куски, суммарный объем которых составляет половину объема от крупного куска.

Как следует из выражения (2), динамическая разрушаемость учитывает основные характеристики горной породы и параметры взрыва.

Выражение (1) для определения величины полного импульса взрыва не очень удобно для практических расчетов, т.к. в нем в явном виде не присутствует один из основных показателей – масса шпурового заряда ВВ, поэтому с целью более удобного использования на практике данное выражение можно преобразовать.

Массу шпурового заряда ВВ выразим через объем заряда и плотность ВВ:

$$M = V_z \cdot \rho_v = \frac{\pi d_z^2}{4} \cdot L_z \cdot \rho_v, \quad (4)$$

где: V_z – объем шпурового заряда, м³.

Среднее давление в зарядной камере P_c равно [2]:

$$P_c = \frac{\rho_v \cdot D^2}{2 \cdot (1 + \gamma)}, \quad (5)$$

где: γ – коэффициент Грюнайзена, $\gamma = 2,1 \cdot (0,001 \cdot \rho_v)^{0,73}$ [6];

Длительность начального импульса составит [1]:

$$\tau_0 = \frac{L_z}{D \cdot \sqrt{3/8}}, \quad (6)$$

Подставляя указанные значения в формулу (1), получаем:

$$J = I \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot P_c \cdot \tau_0 = I \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \frac{\rho_v \cdot D^2}{2 \cdot (1 + \gamma)} \cdot \frac{L_z}{D \cdot \sqrt{3/8}} \cdot \frac{4 \cdot d_z}{4 \cdot d_z} =$$

$$= I \left(\pi \cdot \frac{d_z^2}{4} \cdot L_z \cdot \rho_v \right) \cdot D \cdot \left(\frac{2}{(1 + \gamma) \cdot \sqrt{3/8}} \right) \cdot \frac{L_z}{d_z} = I \cdot M \cdot D \cdot \alpha \cdot \frac{L_z}{d_z}.$$

Таким образом, окончательно получаем полный импульс давления, выраженный через массу шпурового заряда ВВ:

$$J_m = I \cdot M \cdot D \cdot \alpha \cdot \frac{L_z}{d_z} \quad (7)$$

Как показывают расчеты, для ВВ типа аммонит 6 ЖВ значение коэффициента α равно:

$$\alpha = \frac{2}{(1 + \gamma) \cdot \sqrt{3/8}} \approx 1.$$

В работе [7] была предложена формула для определения ЛНС удлинённых зарядов с учетом степени дробления i_v , коэффициента использования шнура η , импульса взрыва и динамической прочности породы:

$$W = \frac{1}{i_v} \cdot \sqrt{\frac{J}{\eta \cdot I_i}} \quad (8)$$

Подставляя значение полного импульса давления, выраженного через массу шпурового заряда, получаем расчетное значение ЛНС для любого ВВ и диаметра заряда:

$$W_{J_m} = \frac{1}{i_v} \cdot \sqrt{\frac{J_m}{\eta \cdot I_i}} = \frac{1}{i_v} \cdot \sqrt{\frac{I \cdot M \cdot D \cdot \alpha \cdot L_z}{\eta \cdot I_i \cdot d_z}} \quad (9)$$

В работе [4] предложен способ определения ЛНС, основанный на методе последовательного приближения, т.к. предлагаемые уравнения аналитически не решаются. Уравнение (9) позволяет аналитически решать поставленную задачу, т.е. находить величину ЛНС исходя из заданных параметров шпурового заряда и технологически необходимой степени дробления взрывааемых пород.

Для оценки значений ЛНС, получаемых по формуле (9), были использованы величины нормальных ЛНС шпуровых зарядов ВВ с учетом крепости взрывааемых пород, работоспособности ВВ и диаметров патронов, указанные в табл. 19 [8]. На основе этих данных для ВВ типа аммонит 6ЖВ (работоспособность 360-380 см³, диаметр патрона 32 мм) была построена зависимость ЛНС от крепости пород f по средним значениям интервалов величины крепости и ЛНС (рис. 1).

Наибольший коэффициент корреляции наблюдается при описании указанных значений логарифмической функцией вида:

$$W = -0,193 * \ln(f) + 0,9986. \quad (10)$$

При взрывании шпуров в подземных условиях средний размер куска может быть определен по формуле [7]:

$$d_k = \frac{W}{i_v}, \quad (11)$$

где: d_k – средний диаметр куска взорванной горной массы, м; W – линия наименьшего сопротивления (ЛНС) используемого заряда ВВ при коэффициенте сближения $m = 1$, м; i_v – степень дробления взорванной горной массы. В практике взрывных работ в забоях ограниченной площади с одной свободной поверхностью обычно используются шпуров глубиной 1,5-3,0 м [8], при этом наиболее часто в породах различной крепости используются шпуров глубиной 1,8-2,2 м.

В данной работе расчеты сделаны для шпуров диаметром 32 мм, глубиной 2,2 м, при этом длина заряда с учетом требований п. 266 ПБ [1] (длина забойки не менее 0,5 м) составит 1,7 м.

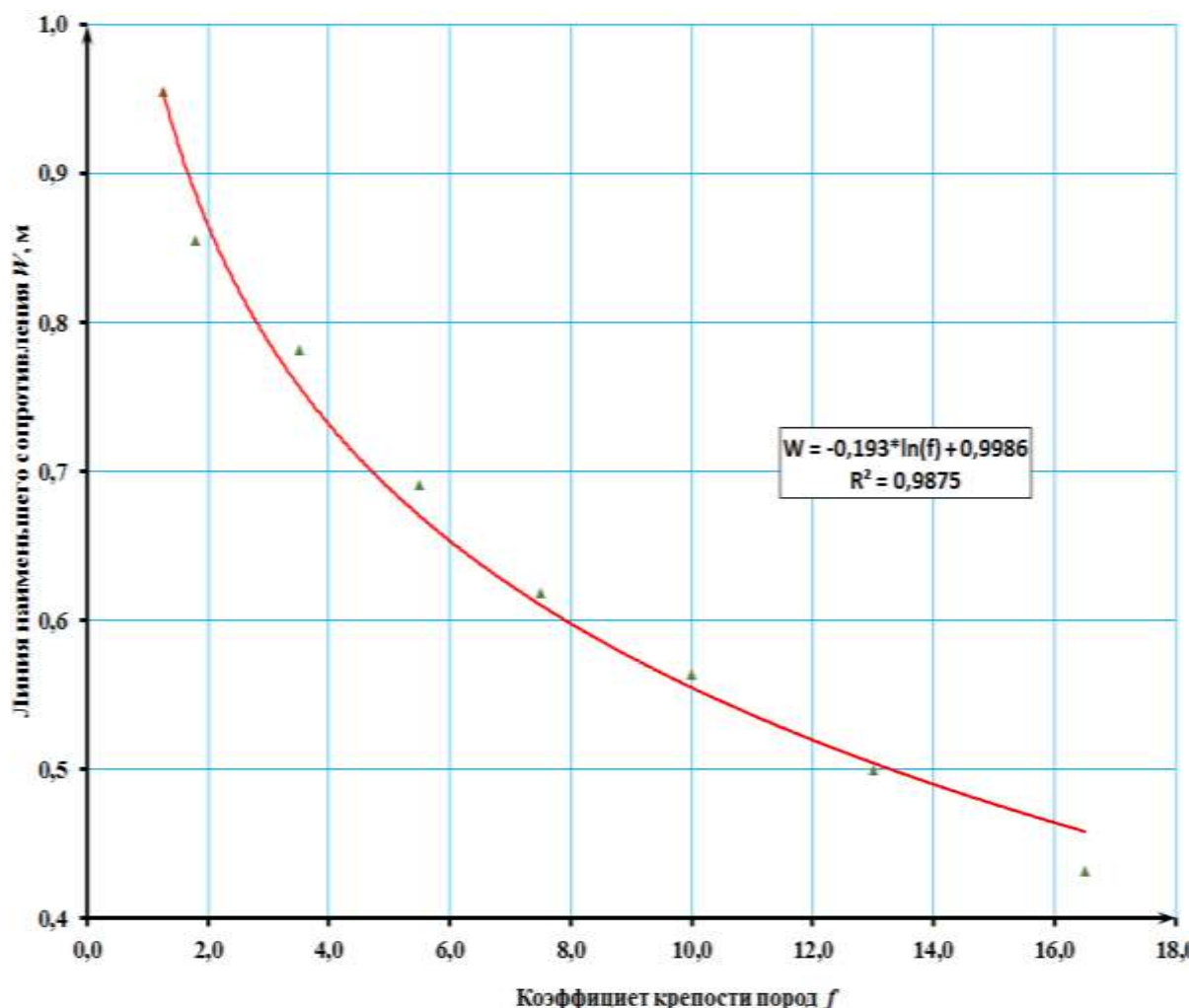


Рис. 1. Зависимость ЛНС от коэффициента крепости f по данным табл. 19 [8]

В табл. 1 указаны основные физико-механические свойства пород, которые использованы в расчетах, а также расчетные значения теоретического показателя динамической прочности породы.

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород

№	Порода	ρ , кг/м ³	C , м/с	σ , МПа	I_i , Па·с	μ	f
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Сильвинит	2020	3820	30,0	13160,96	0,20	3,00
2	Сиенит	2600	1796	42,2	13749,43	0,10	4,22
3	Кварцит трещиноватый	2730	3021	48,0	26525,41	0,12	4,80
4	Мрамор белый	2730	4420	75,0	46306,32	0,25	7,50
5	Гнейс	2850	6080	117,5	97667,85	0,28	11,75
6	Диабаз 1 порфиритовый	2440	5040	130,0	68679,90	0,33	13,00
7	Габбро-диабаз 1	2850	400	150,0	115620,24	0,26	15,00
8	Порфирит	2930	6410	160,0	134979,01	0,31	16,00
9	Сланец 3	2710	5750	176,0	140327,85	0,25	17,60

В табл. 2 даны значения ЛНС, рассчитанные по выражению (9), степень дробления и средние размеры кусков, определенные по формуле (11) для пород, указанных в табл. 1, для трех значений КИШ: $\eta_1 = 0,85$, $\eta_2 = 0,9$ и $\eta_3 = 0,95$. Для наглядности расчетные значения ЛНС и средние размеры кусков указаны в см.

Таблица 2

Значения ЛНС и средний диаметр кусков породы

№	Порода	i_v	$\eta_1 = 0,85$		$\eta_2 = 0,9$		$\eta_3 = 0,95$	
			W_{Jm1} , см	d_{k1} , см	W_{Jm2} , см	d_{k2} , см	W_{Jm3} , см	d_{k3} , см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Сильвинит	6,5	69,8	10,7	67,8	10,4	66,0	10,2
2	Сиенит	6,5	68,3	10,5	66,3	10,2	64,6	9,9
3	Кварцит трещиноватый	5,5	58,1	10,6	56,4	10,3	54,9	10,0
4	Мрамор белый	5	48,3	9,7	47,0	9,4	45,7	9,1
5	Гнейс	4	41,6	10,4	40,4	10,1	39,3	9,8
6	Диабаз 1 порфиритовый	5	39,7	7,9	38,6	7,7	37,5	7,5
7	Габбро-диабаз 1	4	38,2	9,6	37,2	9,3	36,2	9,1
8	Порфирит	4	35,4	8,9	34,4	8,6	33,5	8,4
9	Сланец 3	4	34,7	8,7	33,7	8,4	32,8	8,2

На рис. 2 показана зависимость величины ЛНС (W , м) от коэффициента крепости горных пород f .

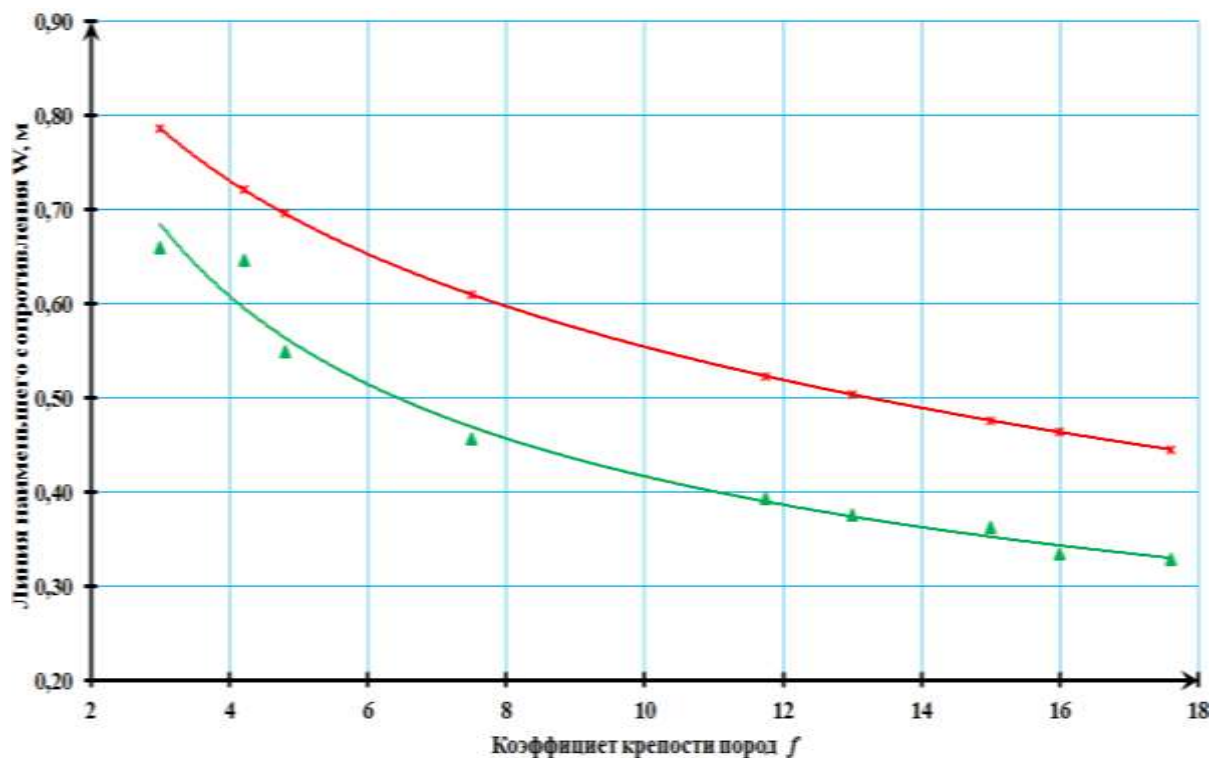


Рис. 2. Зависимость величины ЛНС от коэффициента крепости пород f

Верхняя кривая представляет логарифмическую зависимость, построенную на основе формулы (10) по значениям коэффициента крепости пород f , указанных в табл. 1 (столбец 8), при этом степень дробления и средний размер куска взрываваемой горной массы неизвестны.

Нижняя кривая построена на основе выражения (9) с учетом значений коэффициента крепости пород f , указанных в табл. 1 (столбец 8), при величине КИШ $\eta_3 = 0,95$, и значениях степени дробления взорванной горной массы, указанных в табл. 2 (столбец 3). Как видно из рис. 2, кривые практически параллельны друг другу.

Разность между величиной ЛНС по фиксированным значениям коэффициента крепости f (столбец 8, табл. 1) на рассматриваемых графиках лежат в диапазоне от 0,07 м до 0,15 м, при этом зависимость (9) дает в среднем меньшее расчетное значение ЛНС на 0,12 м. Величина степени дробления при указанных значениях ЛНС изменяется от 4,0 до 6,5, средний размер куска – от 7,5 см до 10,2 см, что вполне приемлемо при ведении БВР шпуровым способом в подземных условиях.

Выводы

1. Хорошая сходимость величин ЛНС (рис. 2) позволяет рекомендовать формулу (9) для практических расчетов параметров БВР ведении подземных взрывных работ шпуровым способом.

2. Полученная зависимость ЛНС (9) от полного импульса давления взрывных газов шпурового (удлинённого заряда) позволяет рассчитать величину ЛНС для пород различной крепости при заданной степени дробления, что возможность в конечном итоге подобрать параметры БВР с учетом технологически оптимального среднего размера кусков взрываваемой горной породы.

3. При указанных параметрах (длина шнура – 2,2 м, длина заряда ВВ аммонит 6ЖВ – 1,7 м, диаметр заряда (патрона) – 32 мм, диаметр шнура – 42 мм, радиальный зазор $\Delta \approx 0,313$) расчетная величина ЛНС, вычисленная по формуле (9) для пород, указанных в табл. 1-2, удовлетворяет требованиям п. 280 ПБ [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. 3.12.2020, № 494, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 352 с. – (Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области взрывных работ и изготовления взрывчатых материалов: сер. 13, вып. 15).
2. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
3. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
4. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учётом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 42-46. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.9.
5. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение радиуса зоны трещиноватости от одиночного шпурового заряда с радиальным зазором при торпедировании выбросоопасных пластов // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 54-59. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.9.
6. Andreiko S.S., Maltsev V.M., Anikin V.V., Nesterov E.A. Calculation of crack formation radius by modeling the explosive charge with a radial clearance // XXIIIND Winter School on Continuous Media Mechanics. – 2021. – V. 32. – С. 3-9. – (Сер. книг Procedia Structural Integrity). – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.002.
7. Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь, 1984. – 195 с.
8. Росинский Н.Л., Магойченков М.А., Галаджий Ф.М. Мастер-взрывник: учебник для проф. обучения рабочих на пр-ве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1988. – 384 с.: ил.

УДК 622.2

DOI:10.7242/echo.2022.1.7

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПОРОД В ПРИКОНТУРНОМ МАССИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКВАЖИННОГО ГИДРОДОМКРАТА

Д.А. Поспелов, В.Н. Токсаров, Н.Л. Бельтюков
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье приведена методика определения модуля деформации осадочных горных пород в натуральных условиях с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана. По результатам предварительных экспериментальных исследований установлено, что показатель модуля деформации вмещающих пород может быть использован для оценки степени нарушенности приконтурного массива, т.к. в зоне неупругого деформирования пород, формирующихся в окрестности горных выработок, отмечаются пониженные значения модуля деформации.

Ключевые слова: модуль деформации, скважинный гидродомкрат, давление, деформационные свойства.