



**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ
НА ШАХТЕ “МАГНЕЗИТОВАЯ”**

П. В. Меньшиков, В. А. Кутуев, С. Н. Жариков

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: menshikovpv@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка 58, г. Екатеринбург 620075, Россия*

Представлены результаты исследований воздействия ударной волны технологических взрывов в подземных условиях. Проведены инструментальные замеры фактических значений давления на фронте ударно-воздушной волны (УВВ) при ведении взрывных работ на шахте “Магnezитовая”. На их основе определены безопасные расстояния по воздействию УВВ, исключающие травмирование людей. Выполнен расчет избыточного давления на фронте УВВ с учетом местных сопротивлений горных выработок. Осуществлено сравнение зарегистрированных значений избыточного давления с предельно допустимыми для рабочих, деревянных перемычек, вентиляционных трубопроводов, электрооборудования и электросетей.

Взрывные работы, технологический взрыв, взрывные работы в подземных горных выработках, ударная воздушная волна, избыточное давление на фронте УВВ, предельно допустимое избыточное давление, промышленная безопасность подземных горных работ, коэффициент ослабления (усиления)

**STUDY OF A SHOCK WAVE IN UNDERGROUND WORKINGS
OF THE MAGNEZITOVAYA MINE**

P. V. Menshikov, V. A. Kutuev, and S. N. Zharikov

*Institute of Mining Engineering of the Ural branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: menshikovpv@mail.ru, ul. Mamina-Sibiryaka, 58, Ekaterinburg 620075, Russia*

The results of studying the impact of a shock wave of technological underground blasts are presented. Instrumental measurements of the actual pressure values at the front of an air shock wave (ASW) during blasting operations at the Magnezitovaya mine were carried out. Safe distances for the effect of air shock wave excluding injury to people are determined on their basis. The calculation of the excess pressure at the air shock front is made taking into account the local resistance of mine workings. A comparison of the recorded values of excess pressure with the maximum permissible values for workers, wooden lintels, ventilation pipelines, electrical equipment and power grids is carried out.

Blasting operations, technological blast, blasting in underground mine workings, air shock wave, excess pressure at the ASW front, maximum permissible excess pressure, industrial safety of underground mining, attenuation (gain) ratio

Цель исследования в промышленных условиях заключалась в определении параметров ударного воздействия на выработки для последующего уточнения рациональных схем и параметров буровзрывных работ (БВР) при ведении очистных работ, обеспечивающих приемлемый уровень воздействия УВВ [1 – 3] от технологических взрывов скважинных зарядов на подземную инфраструктуру шахты “Магnezитовая”. Актуальность исследований — обеспечение промышленной безопасности подземных горных работ.

Замеры давления на фронте УВВ осуществлялись цифровым сейсморегистратором MiniMate Plus с использованием линейного микрофона Series III L Microphone (“InstanTel”, Канада) и измерителем DataTrap II (“MREL”, Канада) и датчиков давления ICP карандашного типа. Измерения проводились в подземных горных выработках при веерной скважинной отбойке на шахте “Магnezитовая”. По результатам замеров давления на фронте УВВ с помощью программных средств BlastWare III и Data Acquisition Suite на компьютере определялись расчетные величины в динамике процесса [4–7]. Схема горных выработок с расположением точек измерений избыточного давления на фронте УВВ и мест ведения взрывных работ показана на рис. 1.

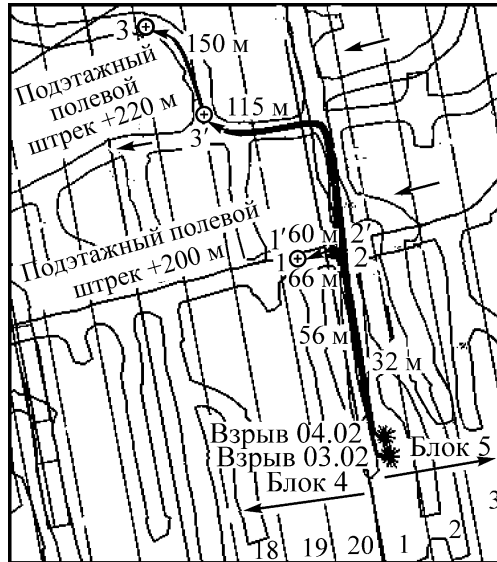


Рис. 1. Схема горных выработок с расположением точек измерений и мест ведения взрывных работ (очистная камера № 1, блок № 5)

Параметры взрывных работ, проводимых на шахте “Магnezитовая” в очистной камере № 1, блок № 5 на гор. +220 м при веерной скважинной отбойке и расстояния от места ведения взрывных работ до точек замеров давления на фронте УВВ представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры взрывных работ, проводимых в шахте “Магnezитовая”

Параметр	Дата и место взрыва	
	03.02.2020.	04.02.2020.
	Блок № 5, очистная камера № 1, гор. +220 м	
Наименование породы	Магnezит	
Коэффициент крепости породы (руды), ед.	10–11	
Сечение камеры, м ²	72	
Объем отбиваемого слоя, м ³	72	
Диаметр скважин, мм	76	
Количество скважин в слое, шт	12	
Количество вееров скважин, шт	1	
Общая длина скважин, м	84	
Глубина скважин, м	5.8–9.5	
Длина заряжаемой части, м	4–6	
Величина недозаряда, м	0.8–3.5	
Масса заряда ВВ в скважинах, кг	16–24	
Максимальная масса одновременно взрываемого заряда в ступени замедления, кг	1 ступень — 44 (6, 7 скв.); 2 ступень — 84 (4, 5, 8, 9 скв.); 3 ступень — 72 (2, 3, 10, 11 скв.); 4 ступень — 40 (1, 12 скв.)	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 1

Общий расход ВВ на взрыв одного ряда, кг	Грамотол Т18 – 240; Аммонит 6ЖВ-200 – 4.8	
Насыпная плотность ВВ, кг/м ³	900	
Удельный расход ВВ, кг/м ³	3.33	
Количество ступеней замедлений, шт	4	
Интервалы замедлений, мс	Искра-Ш 25, 75, 125, 250	
Расстояние по горизонтали до камеры № 20, блок № 4, подэтажный полевой штрек, гор. +200 м (т. 1 и 1'), м	66	60
Расстояние по горизонтали до камеры № 1, блок № 5, подэтажный полевой штрек, гор. +200 м (т. 2 и 2'), м	56	52
Расстояние по горизонтали до камеры № 18, блок № 4, участковый автоуклон, гор. +200/220 м (т. 3 и 3'), м	150	115

Максимальное давление на фронте УВВ составило 17 346 Па в камере № 20, блок № 4 в подэтажном полевом штреке на гор. +200 м (т. 1) во время проведения технологического взрыва 3 февраля 2020 г. При измерениях выяснилась характерная особенность оборудования. В камере № 1, блок № 5 (т. 2 и 2') измеритель DataTrap II не зарегистрировал сигнал из-за попадания воды в датчик давления. Максимальное давление на фронте УВВ в камере № 18, блок № 4 на участковом автоуклоне гор. +200/220 м составило более 500 Па, так как во время измерений зашкалило верхний предел возможности измерений регистратором MiniMate Plus. Результаты инструментальных замеров давления на фронте УВВ показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты инструментальных замеров давления на фронте УВВ

Дата взрыва	Место замера	Регистратор	Место взрыва	Максимальное давление на фронте УВВ, Па	Звуковое давление, дБ	Максимальная масса в ступени замедления, кг	Расстояние от места взрыва до места замера, м
03.02.2020 23:00	Камера № 20, блок № 4, гор. +200 м	DataTrap II (т. 1)	Очистная камера № 1, блок № 5, гор. +220 м	17 346	—	84	66
	Камера № 1, блок № 5, гор. +200 м	DataTrap II (т. 2)		—	—		56
	Камера № 18, блок № 4, гор. +200 м	MiniMate Plus (т. 3)		> 500	68.9		150
04.02.2020 23:50	Камера № 20, блок № 4, гор. +200 м	DataTrap II (т. 1')		12 940	—		60
	Камера № 1, блок № 5, гор. +200 м	DataTrap II (т. 2')		—	—		52
	Камера № 18, блок № 4, гор. +220 м	MiniMate Plus (т. 3')		> 500	73.3		115

График давления на фронте УВВ при замерах в камере № 20, блок № 4 в подэтажном полевом штреке на гор. +200 м во время проведения технологического взрыва 03 февраля 2020 г. приведен на рис. 2.

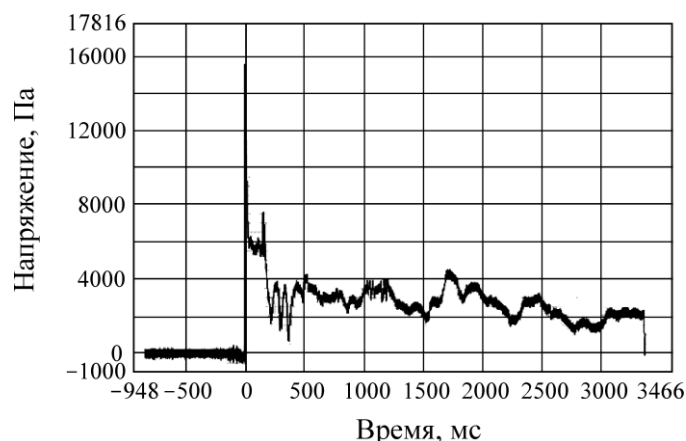


Рис. 2. Изменение давления на фронте УВВ (03.02.2020). Место замера — камера № 20, блок № 4 в подэтажном полевом штреке на гор. +200 м — т. 1. Максимальное давление УВВ — 17.35 кПа при $t = 0.415$ мс

Расчет безопасных расстояний и избыточного давления на фронте ударной волны от технологических взрывов выполнен согласно [8]. Для определения безопасных расстояний по воздействию УВВ, исключающих травмирование людей, повреждение сооружений и технологического оборудования при производстве взрывных работ в подземных горных выработках рассчитывается избыточное давление на фронте УВВ для сечения выработок 15.5 м^2 с расстояниями от 10 до 150 м:

$$\Delta P = \left\{ 3410 \frac{Q_3}{\sum S} + 794 \sqrt{\frac{Q_3}{\sum SR}} \right\} e^{-\frac{\beta R}{d}},$$

где $\sum S = 15.5$ — суммарная площадь поперечного сечения выработок, примыкающих к заряду, для которых проводится расчет давления в УВВ, м^2 ; Q_3 — масса одновременно (мгновенно) взорванного эквивалентного заряда, кг; R — расстояние, пройденное УВВ от заряда до расчетной точки, м; $e = 2.71$ — основание натурального логарифма; $\beta = 0.022$ — коэффициент шероховатости поверхности; $d = 1.12\sqrt{S}$ — приведенный диаметр выработки, м.

Величина эквивалентного заряда вычисляется следующим образом:

$$Q_3 = 12PdK_3N,$$

где P — вместимость взрывчатых веществ 1 м скважины, кг; K_3 — коэффициент, учитывающий соотношение длины забойки или недозаряженной части взрывной полости к диаметру скважин; N — число зарядов в группе, шт (максимальное количество зарядов $N = 4$).

Результаты расчетов избыточного давления на расстояниях от 10 до 150 м с учетом коэффициентов ослабления (усиления) для местных сопротивлений участков выработок в сравнении с измеренным давлением на фронте УВВ представлены в табл. 3. Видно, что измеренные значения избыточного давления на фронте УВВ в реальных условиях (т. 1 и 1') приблизительно подтверждают расчетные значения, вычисленные по формуле (1).

Согласно [8] (п. 866) предельно допустимое избыточное давление на фронте УВВ для людей следует принимать 0.1 кг/см^2 (10 кПа). В Приложении № 27 ФНиП [8] предельно допустимые значения избыточного давления на фронте УВВ составляют: для деревянных перемычек 10 кПа, для вентиляционных трубопроводов — 15 кПа, для электрооборудования — 20 кПа, для электросетей — 30 кПа, для вентиляторов местного проветривания — 40 кПа, а для горных выработок с арочной крепью — 150 кПа.

ТАБЛИЦА 3. Избыточное давление на расстояниях от 10 до 150 м с учетом коэффициентов ослабления (усиления) для местных сопротивлений участков выработок

Расстояние, R , м	Расчетное избыточное давление P , Па	Коэффициент ослабления (усиления) δ	Расчетное избыточное давление P (с учетом δ), Па		Измеренное давление на фронте УВВ, Па	
10	95865	1.00	95865		—	
20	81575	1.33	108495		—	
30	73727	1.33	98057		—	
40	67943	1.33	90365		—	
50	63214	1.33	84075		—	
52 (т. 2')	62355	1.33	82932		нет замера	
56 (т. 2)	60707	1.33	80740	20185*	нет замера	
60 (т. 1')	59141	1.33	0.33*	78657	19664*	12940*
66 (т. 1)	56926	1.33	0.33*	75711	18928*	17346*
70	55527	1.33	73851		—	
80	52262	1.33	69508		—	
90	49276	0.33	16384		—	
100	46523	0.33	15469		—	
110	43969	0.33	14620		—	
115 (т. 3')	42759	0.12	5260		> 500	
120	41590	0.12	5117			
130	39365	0.12	4843			
140	37280	0.12	4586			
150 (т. 3)	35322	0.12	4345			

Примечание. * — по направлению распространения УВВ до точек 1 и 1'

В [9] приведены немного другие значения разрушающих нагрузок, например: опрокидывание, деформация частей и повреждение деталей проходческих машин, в том числе зарядных машин и буровых установок происходит при разрушающем избыточном давлении 25 – 140 кПа, деформация водо-воздухопроводов, подвешенных к стенке выработки в результате обрыва крепления — 30 – 50 кПа, а деформация электросетей в результате обрыва крепления — 35 – 42 кПа.

ВЫВОДЫ

Установлено, что ответвления и пересечения горных выработок, в особенности большое количество поворотов и увеличение площади их сечения, значительно ослабляют ударно-воздушную волну. Для определения безопасных расстояний по ее воздействию при взрывании в подземных условиях необходимо учитывать местные сопротивления на участках горных выработок.

При проведении взрывных работ на шахте “Магnezитовая” в феврале 2020 г. зарегистрированное максимальное избыточное давление на фронте УВВ составило 17.35 кПа на расстоянии 66 м (т. 1) от места ведения взрывных работ (очистная камера № 1, блок № 5). Это значение превышает предельно допустимое избыточное давление на фронте УВВ для людей и деревянных перемычек в 1.73 раза, а для вентиляционных трубопроводов — в 1.16 раз. При этом оно ниже избыточного давления для электрооборудования и электросетей в 1.15 и 1.73 раза соответственно. Для горных выработок с арочной крепью максимальное избыточное давление на фронте УВВ оказалось ниже предельно допустимого в 8.6 раз.

На расстоянии 110 м от места ведения взрывных работ в очистной камере № 1 (блок № 5, гор. +220 м) по пути распространения УВВ до поворота выработки на участковый автоуклон гор. +200/220 м (т. 3 и 3') избыточное давление почти во всех случаях превышает предельно допустимое для человека (10 кПа) и это расстояние является опасным. На расстоянии 115 м при повороте на участковый автоуклон оно в 2 раза меньше предельно допустимого и по результатам измерений составляет более 500 Па, а по расчетным данным — 5.26 кПа, однако нижний предел повреждения для человека присутствует (5 кПа) и существует опасность

поражения. На расстоянии 130 м на закруглении участкового автоуклона значение давления меньше предельно допустимого и по расчетным данным составляет 4.84 кПа, следовательно на расстоянии более 130 м поражение и травмирование человека маловероятно.

Таким образом, при проведении буровзрывных работ в подземных горных выработках на шахте “Магнетитовая” безопасное расстояние по избыточному давлению на фронте УВВ для людей, в рамках применяемых схем отбойки, составляет более 130 м. Расположение персонала, выполняющего взрывные работы ближе к забою, может привести к поражению людей ударной волной. В случае увеличения диаметра скважин, плотности заряжания, количества зарядов ВВ в группе, а также уменьшения суммарной площади поперечного сечения выработок безопасное расстояние по воздействию УВВ, исключающее травмирование людей, должно быть увеличено согласно [8].

Авторы выражают признательность А. С. Флягину и С. С. Таранжину за помощь в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Sadovsky M. A.** Selected works: Geophysics and Physics of Explosion. Moscow, Nauka, 2004, 440 pp. (in Russian) [**Садовский М. А.** Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 2004. — 440 с.]
2. **Physics of explosion.** Moscow, Fizmatlit, 2004, 148 pp. (in Russian) [**Физика взрыва.** — М.: Физматлит, 2004. — 148 с.]
3. **Zeitlin Ya. I. and Smoliy N. I.** Seismic and shock-air waves of industrial explosions. Moscow, Nedra. 1981. (in Russian) [**Цейтлин Я. И., Смолий Н. И.** Сейсмические и ударно-воздушные волны промышленных взрывов — М.: Недра. — 1981. — 192 с.]
4. **MiniMate Plus.** Operator Manual. Canada, Ontario: InstanTEL, 2001, 43 pp. [**MiniMate Plus.** Руководство по эксплуатации. — Канада, Онтарио: Инстантел. — 2001. — 43 с.]
5. **DataTrap II data/vod Recorder.** Operator Manual. Canada: MREL Group of Companies Limited. Edition 3.0, 2013. [**DataTrap II data/vod Recorder.** Руководство оператора. Канада: МРЭЛ, 2013. — 102 с.]
6. **Methods of measuring the speed of seismic vibrations and pressure at the front of a shock air wave using a MiniMate Plus digital seismic recorder, a URAN registration and analysis device, and an autonomous AIR-meter.** STO 01.01.001, 2011 (Standard of Organization), Ekaterinburg, 2011, 15 pp. [**Методика измерений скорости сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием цифрового сейсморегистратора MiniMate Plus, устройства регистрации и анализа УРАН и автономного измерителя-регистратора АИР.** СТО 01.01.001. — Екатеринбург, 2011. — 15 с.]
7. **Methods of measuring the detonation velocity of explosives by the rheostatic method, the deceleration intervals between explosions of borehole charges, accelerating seismic vibrations and pressure at the front of an air-blast plane using a DATATRAP II DATA / VOD Recorder.** STO 01.01.001, Ekaterinburg, 2019, 28 pp. [**Методика измерений скорости детонации взрывчатых веществ реостатным методом, интервалов замедления между взрывами скважинных зарядов, ускорения сейсмических колебаний и давления на фронте УВВ с использованием измерителя скорости детонации DATATRAP II DATA/VOD Recorder.** СТО 01.01.001. — Екатеринбург, 2019. — 28 с.]
8. **Federal Rules and Regulations on Industrial Safety.** Safety Rules for Blasting Operations (approved by Order of Rostekhnadzor dated December 16, 2013, no. 605, as amended by Order of Rostekhnadzor dated November 30, 2017, no. 518). [**Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности.** Правила безопасности при взрывных работах (утв. приказом Ростехнадзора от 16 декабря 2013 г. № 605, в ред. Приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 № 518).]
9. **Kutuzov B. N.** Safety of blasting in mining and industry: a training manual. Moscow, Gornaya kniga, 2009, 671 pp. (in Russian) [**Кутузов Б. Н.** Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности: учеб. пособие. — М.: Горная книга, 2009. — 671 с.]