УДК 622.235.5:622.271

Самусев Павел Александрович, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Samusev P.A., associate professor, candidate of technical sciences
(Kuzbass State Technical University, Kemerovo)

Новиньков Алексей Геннадьевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Novinkov A.G., associate professor, candidate of technical sciences
(Kuzbass State Technical University, Kemerovo)

Протасов Сергей Иванович, к.т.н., директор
(Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», Кемерово)
Protasov S.I., candidate of technical sciences, director
(Innovation Firm «KUZBASS-NIIOGR», Kemerovo)

ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

IMPACT OF AIR SHOCK WAVES DURING BLASTING OPERATIONS

В работе рассмотрены российские и зарубежные исследования критериев повреждаемости зданий и сооружений от действия ударных воздушных волн, возникающих при ведении взрывных работ.

The paper considers Russian and foreign studies of the criteria for damage to buildings and structures from the effects of shock air waves arising from blasting operations.

В последние 20 лет кафедра ОГР КузГТУ в содружестве с Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» проводит исследования по проблеме обеспечения безопасности массовых взрывов, проводимых на разрезах Кузбасса, расположенных в непосредственной близости от населенных пунктов. В первую очередь это касается проблемы защиты охраняемых объектов от сейсмического действия взрыва.

За прошедшие годы авторами разработан надежный научно-методический подход, позволяющий по результатам проведения экспериментальных взрывов, с инструментальной регистрацией сейсмических колебаний, разрабатывать рекомендации по сейсмобезопасным параметрам массовых взрывов, обеспечивающие безопасное ведение буровзрывных ра-

бот и минимизирующие негативное сейсмическое воздействие на охраняемые объекты [1-13].

В последние 10 лет остро встала еще одна проблема обеспечения безопасных условий ведения взрывных работ - по действию ударной воздушной волны (УВВ). В этой связи в данной работе выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований критериев повреждаемости зданий и сооружений от действия ударных воздушных волн, а также приведены сведения о зарегистрированных значениях УВВ на одном из разрезов.

На рис. 1 представлена характерная запись ускорений колебаний грунта от массового взрыва на одном из разрезов, под защищаемым объектом как непосредственно от действия сейсмических волн, так и от воздействия ударной воздушной волны.

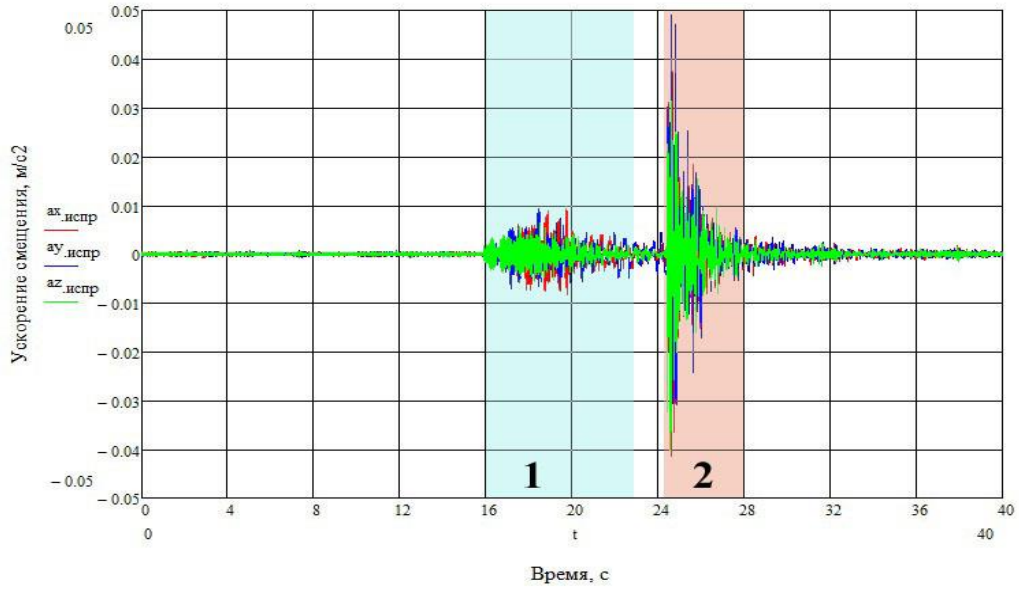

Рис. 1. Характерная акселерограмма земной поверхности, зарегистрированная на одном из разрезов Кузбасса:

1 – фаза сейсмического действия взрыва;

2 – фаза действия ударной воздушной волны.

На малых расстояниях до защищаемого объекта разделить действие воздушных и сейсмических волн невозможно. По мере удаления от взрываемого блока удается выделить и этап вступления сейсмических волн, и момент прихода ударно-воздушной волны. Причем воздействие ударной воздушной волны может быть сопоставимо или даже больше действия сейсмических волн. По этой причине, УВВ часто накладывают б***о***льшие ограничения на массу взрываемых зарядов, чем сейсмические воздействия взрывов, а контроль и прогнозирование ожидаемых параметров УВВ более затруднительным, чем оценка воздействия сейсмических колебаний.

Уровень возникающего во фронте ударной воздушной волны давления, измеряемый в децибелах, может быть записан в виде выражения

$$P_{\text{дБ}} = 20\log\left(\frac{p_{\text{Па}}}{p0_{\text{Па}}}\right)$$

где $p_{\text{Па}}$ – избыточное давление во фронте волны в Па; $p0_{\text{Па}} = 2 \cdot 10^{-5}$ – избыточное опорное давление в Па, соответствующее порогу слышимости звука частотой 1000 Гц ухом молодого человека.

Пороги дискомфорта и начальных болевых ощущений находятся на уровнях 110 и 140 дБ соответственно [14].

Самые первые исследования, связанные с инструментальной оценкой характеристик ударных воздушных волн (УВВ) именно при горных взрывах, в США были проведены в начале 70-х годов прошлого века [15]. Сразу было установлено, что обычные шумомеры, предназначенные для измерений в звуковом диапазоне от 20 Гц, не могут уловить значительную часть энергии пульсаций давления, приходящейся на инфразвуковой диапазон. Между тем, спектр собственных частот колебаний большого числа зданий и сооружений имеет максимумы именно в диапазоне 2-7 Гц. По этой причине было рекомендовано, чтобы рабочий диапазон инструментов, предназначенных для регистрации давления в УВВ, начинался от 5 Гц.

В исследовании [16] проведен сравнительный анализ параметров, количественно описывающих энергетическое содержание ударной воздушной волны (УВВ). На основании полученных результатов в качестве основной инструментальной характеристики для оценки воздействия взрыва обосновано применение пикового давления — при условии использования измерительной аппаратуры, характеристики которой обеспечивают адекватную чувствительность в требуемом частотном диапазоне.

Сформулированные рекомендации нашли отражение в действующих нормативных документах [17], регламентирующих предельно допустимые значения пикового давления при проведении промышленных взрывов.

В соответствии с указанными нормативами установлены следующие предельные значения пикового давления во фронте УВВ [14]: для измерительных приборов с нижней границей рабочего диапазона от 0,1 Гц - не более 134 дБ; для измерительных приборов с нижней границей рабочего диапазона от 2 Гц (наиболее распространённый в практике взрывных работ тип датчиков) - не выше 133 дБ; для шумомеров, осуществляющих регистрацию сигнала исключительно в звуковом диапазоне с применением взвешивающей кривой типа «С» - не более 105 дБ. При данном давлении во фронте ударной воздушной волны гарантируется отсутствие повреждений, в том числе и повреждений остекления [14].

Достаточно полный обзор критериев безопасности, связанных с действием УВВ, приведен в отчете Бюро горных работ Министерства внутренних дел США [18]. В результате анализа полученного материала было рекомендовано установить расчетное значение избыточного давления во фронте УВВ на уровне 134 дБ. Также в этой работе указывается, что хотя

используемое ранее значение предельно допустимого давления во фронте УВВ в 140 дБ является достаточно безопасным по критерию повреждаемости, но все-таки эта величина продуцирует большое количество жалоб со стороны жителей близлежащих территорий. Принятие нового значения в 134 дБ позволит понизить вероятность появления повреждений до 2-5 %, а вероятность появления жалоб понизится до 5-10 % (т.е. от 5 до 10 % домов будут испытывать дребезжание стекол). Тем не менее, отдельные жалобы на взрывные работы могут начинаться от уровней в 120 дБ.

В ведомственных документах Бюро открытых горных работ («Руководство по ведению взрывных работ») [19] отмечается, что для минимизации жалоб жителей уровень давления в ударной воздушной волне не должен превышать 110 Дб.

Имеющиеся отечественные данные согласуются с результатами зарубежных исследований. Так, например, в табл. 7 [20] избыточное давление, соответствующее слабой степени повреждений по критерию разрушения оконного остекления, составляет 0,01-0,005 кгс/см2 (154-148 дБ). По данным, приведенным в [21], плохо закрепленные стекла разрушаются при избыточном давлении 0,7 кПа (151 дБ). С учетом запаса там же рекомендовано принимать избыточное давление равным величине 0,5 кПа (148 дБ).

Имеются сведения других авторов [22] по предельно допустимым значениям избыточного давления на фронте УВВ для застекления (табл. 1).

Таблица 1

Предельно допустимые значения избыточного давления на фронте УВВ для застекления

Степень безопасности	Возможные повреждения застекления	Избыточное давление ΔP, кПа	Избыточное давление ΔP, дБ
1	Отсутствие повреждений	0,5	148
2	Случайные повреждения	1,5	158
3	Полное разрушение	5,0	168

При оценке влияния слабых ударных волн должна учитываться не только звуковая часть спектра давления во фронте волны, но и неслышимая, инфразвуковая, часть спектра. Российские нормы до выхода Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности (ФНП) «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [23], не предоставляли предельные значения давления во фронте ударных воздушных волн по критерию повреждаемости зданий и сооружений.

В соответствии с ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [23] предельно допустимое избыточное давление во фронте ударной

воздушной волны из условия повреждения остекления не должно превышать 2 кПа (Прил. 28 к ФНП), что соответствует величине 160 дБ.

В правилах [23], приведен перечень предельно допустимых значений избыточного давления на фронте УВВ для некоторых объектов (табл. 2).

Таблица 2

Перечень предельно допустимых значений избыточного давления на фронте УВВ (для некоторых объектов)

№	Наименование	Разрушающее давление, кПа	Разрушающее давление, дБ
1.	**Остекление**	**2**	**160**
2.	Деревянные перемычки	10	174
3.	Вентиляционные трубопроводы	15	178
4.	Электрооборудование	20	180
5.	Электросети	30	184
6.	Вентиляторы местного проветривания	40	186
7.	Лебедки (массой до 1 т)	40	186
8.	Кирпичные перемычки (толщиной 0.2 ... 0.4 м)	50	188
10.	Контактный провод	80	192
12.	Проходческие машины	140	197
13.	Деревянная крепь	80	192
14.	Арочная крепь	150	198
15.	Бетонная перемычка	200 ÷ 400	200-206

В реальных условиях разреза, интенсивность УВВ зависит от большого числа факторов, типа взрывчатых веществ, конструкции и вида применяемого заряда, параметров и способов инициирования заряда, свойств взрываемых пород, взаимного расположения места взрыва и охраняемого объекта. Так же при проведении взрывных работ на земной поверхности существенное влияние оказывают метеоусловия, складывающиеся на момент взрыва, а также наличие преград на пути распространения волны.

Следует отметить, что все расчетные способы оценки давления ударной воздушной волны от массовых взрывов дают большие погрешности.

Наиболее точным инструментом оценки интенсивности УВВ будут экспериментальные замеры с применением современных приборов, способных замерять инфразвуковую часть спектра давления во фронте УВВ.

Сведения о зарегистрированных значениях избыточного давления во фронте ударной воздушной волны от массовых взрывов, при применении неэлектрической системы инициирования, на одном из разрезов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения избыточного давления во фронте ударной воздушной волны

№ п/п	Номер взрыва	Точка регистрации	Значение УВВ, дБ	Расстояние от блока, м	Система инициирования
1.	№ 1	п. Петровский, ул. Петровская, 26	124,1	1634	ДИН
2.		п. Сидоренково, ул. Молодежная, 1/2	124,0	3194	
3.	№ 2	п. Сидоренково, ул. Молодежная, 1/2	101,2	3045	ДИН
4.		п. Петровский, ул. Петровская, 39	118,6	1327	
5.		п. Петровский, ул. Петровская, 40	123,0	1502	
6.	№ 3	п. Сидоренково, ул. Молодежная, 1/2	100,4	4267	Muki
7.		п. Петровский, ул. Петровская, 44	110,8	2320	
8.		с. Коновалово, ул. Светлая, 17	117,5	2269	
9.	№ 4	п. Сидоренково, ул. Молодежная, 1/1	115,8	3322	ДИН
10.		п. Петровский, ул. Петровская, 38	122,6	1614	
11.		п. Петровский, ул. Петровская, 41	122,2	1297	
12.	№ 5	п. Сидоренково, ул. Молодежная, 1/1	109,1	3342	ДИН
13.		п. Петровский, ул. Петровская, 44	122,7	1532	
14.		п. Петровский, ул. Петровская, 41	125,4	1245	
15.		п. Петровский, ул. Петровская, 23	122,0	1679	
16.		с. Коновалово, ул. Светлая, 17	102,2	2905	

Таким образом, значения давления ударной воздушной волны при производстве массовых взрывов во всех случаях, не превышали предельных значений, регламентируемых ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [23], из условия возможного повреждения остекления (как самого слабого элемента охраняемых объектов), но вместе с тем превышали зарубежные рекомендации по минимизации жалоб жителей [18, 19] по уровню давления в ударной воздушной волне не более 110-120 Дб.

Следует отметить также, что, установленное в нормативных документах РФ [23] предельно допустимое значение давления во фронте УВВ в 2 кПа (160 дБ) существенно превышает как нормативные, так и справочные величины допустимых значений, полученные из зарубежных и отечественных источников.

Список литературы

1. Методическое руководство по выбору схем ведения взрывных работ на угольных разрезах с учетом физико-механических свойств угля и использования средств механизации. – Челябинск: НИИОГР, Министерство угольной промышленности СССР, 1981. - 100 с.

2. Бирюков А.В. Прогнозирование гранулометрического состава угля / А.В. Бирюков, С.И. Протасов, П.А. Самусев // В кн.: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы 2-й Междунар. науч.-практ.

конф., г. Кемерово, 11–14 ноября 1997 года. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т; 1997. Ч. 1. С. 165–166.

3. Novinkov A. G., Tashkinov A. S., Protasov S. I., Samusev P. A. Determination of Seismic Safe Distances During Mining Blasts with Consideration of a Dominant Vibration Frequency // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. Atlantis Press. 2016. P. 202-205.

4. Novinkov A., Protasov S., Samusev P. Ensuring Seismic Safety of Underground Mines During Blasting Operations in Combined Surface-Underground Deposit Development // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 174. Article 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401016.

5. Новиньков А.Г. Определение сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах с учетом преобладающей частоты колебаний / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Ташкинов А.С. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 56-62.

6. Новиньков А.Г. Сейсмическая безопасность подземных горных выработок при ведении взрывных работ на земной поверхности / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Безопасность труда в промышленности. - №8, 2018. – С. 64-68.

7. Новиньков А.Г. Сейсмическая безопасность подземного газопровода при массовых промышленных взрывах на угольном карьере / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Вестник КузГТУ. 2013, №6 (100).- С.51-55.

8. Новиньков А.Г. Опыт управления сейсмобезопасностью массовых взрывов / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 3. С. 45-53

9. Новиньков А.Г. Обеспечение сейсмической безопасности строительных объектов при массовых промышленных взрывах с учетом предельных состояний первой группы / Новиньков А.Г., Самусев П.А., Протасов С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 2. С. 48-57.

10. Самусев П.А. Определение дальности разлета отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов / П.А. Самусев, А.Г. Новиньков, С.И. Протасов // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4(23). – С. 4-25. – DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-4-25.

11. Бирюков А.В. Некоторые вопросы гранулометрии / А.В. Бирюков, П.А. Самусев, С.И. Протасов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 1998. № 1 (2). С. 27-28.

12. Бирюков А.В. Дисперсные системы горного дела / А.В. Бирюков, С.И. Протасов, П.А. Самусев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3 (103). С. 60-62.

13. Самусев П. А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 1999. № 2(9). С. 50-51.

14. Новиньков А.Г. Обзор российский и зарубежных исследований критериев повреждаемости зданий и сооружений от действия ударных воздушных волн, возникающих при ведении взрывных работ / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Развитие добычи угля в Кузбассе открытым способом: сб. науч. тр., посвященный 60-летию кафедры «Открытые горные работы» / КузГТУ. - Кемерово: АИ «Кузбассвузиздат, 2015. – с. 214-223 с.

15. Siskind D.E., Summers C.R. Blast Noise Standards And Instrumentation. Technical preReport No78. US Dept, of Interior. Bureau of Mines. 1974. - 18 pp.

16. Stachura W.J., Siskind D.E., Engler A. J. Airblast Instrumentation And Measurement Techniques for Surface Mine Blasting. RI 8508. US Dept, of Interior. Bureau of Mines. 1981.- 53 pp.

17. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects.

18. Structure Response And Damage Produced By Airblast From Surface Mining. RI 8485. US Dept. of Interior. Bureau of Mines. 1980. – 111 pp.

19. M. F. Rosenthal, G. L. Morlock. Blasting Guidance Manual. Directive System. US Department of Interior. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, March 1987. – 201 p.

20. Гурин А.А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах. - М: Недра, 1978. - 81 с.

21. Цейтлин Я.И., Смолий К.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. - М.: Недра, 1981. - 192 с.

22. Ганапольский М.И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности: Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – М. : изд-во «Горная книга», 2011. – 38 с.

23. ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» (утверждены приказом Ростехнадзора от 03.12.2020г. № 494, зарегистрированы в Минюсте России 25.12.2020 г. № 61824).