

УДК 622.271:622.235:550.343.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФРОНТЕ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ

Оника С.Г., Халявкин Ф.Г., Березовский Н.И. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

В статье приведена методика определения избыточного давления на фронте ударных воздушных волн для решения задач безопасности взрывных работ с заданным уровнем надежности.

Введение

При ведении взрывных работ на открытых горных разработках вблизи жилых массивов и промышленных объектов большое значение приобретает защита сооружений от воздействия ударных воздушных волн (УВВ). Ударные воздушные волны возникают вследствие ударного сжатия воздуха, прилегающего к заряду. При расширении продуктов взрыва и удалении ударной волны от центра взрыва интенсивность ее падает, скорость распространения уменьшается и, в конечном счете, она переходит в звуковую волну.

Передняя часть ударной волны или ее фронт распространяется, как правило, со скоростью, превышающей звуковую. Распространяющаяся ударная волна вызывает движение за ее фронтом воздушного потока, давление в котором по мере удаления фронта снижается до атмосферного, переходя затем в волну разряжения.

Основным параметром, определяющим разрушающее действие ударной воздушной волны, является максимальное избыточное давление на ее фронте ΔP . Другим важным параметром, влияющим на степень разрушения строительных объектов, является импульс фазы сжатия, а также продолжительность фазы сжатия. При этом характер воздействия ударных воздушных волн зависит от соотношения времени действия фазы сжатия ($t_{сж}$) и периода собственных колебаний конструкции (T_0) [1].

Если $t_{сж} \gg T_0$, действие ударной волны определяется величиной избыточного давления на ее фронте, так как в этом случае конструкция будет деформирована за промежуток времени, в течение которого давление во фронте волны не успеет существенно упасть. Такой статический характер воздействия ударных воздушных волн наблюдается при $t_{сж} \geq 10T_0$.

Когда $t_{сж} \ll T_0$, конструкция не успевает полностью деформироваться. При этом смещения и деформации сооружения пропорциональны импульсу силы. Импульсивный характер действия ударной волны наблюдается при $t_{сж} \leq 0,25T_0$.

Область, когда $t_{сж} \approx T_0$, является переходной между чисто статическим и импульсным действием силы УВВ.

Результаты исследований

Длительность импульса давления взрывной воздушной волны при взрывах в карьерах – величина того же порядка, что и период собственных колебаний стекла и

различных строительных конструкций. Характер разрушения стекол от массовых взрывов близок к статическому, обусловленному влиянием избыточного давления. В зависимости от его величины объекты подвергаются различным воздействиям.

Таблица 1 – Воздействие УВВ на охраняемые объекты [2]

Повреждение	Избыточное давление, Па
Дребезжание стекол, нарушение витринных окон	200-250
Разрушение слабо вставленных стекол	200-500
Разрушение хорошо укрепленных стекол	1000-3000
Массовое разрушение оконных рам	7000
Разрушение кирпичных стен толщиной 20-30 см	50000-55000

Практически во всех формулах для определения размеров зон разрушения от воздушной волны присутствует величина массы заряда ВВ. Это значит, что существует функциональная зависимость $\Delta P = f(Q^m)$. Показатель m зависит от характера передачи энергии взрыва через среду. В случае статического действия взрыва $m = 1/3$, а при импульсном действии $m = 2/3$. Очевидно, что при $t_{сж}$ близком к T_0 , величина показателя m находится в пределах $1/3 < m < 2/3$ и зачастую принимается равным $1/2$.

Давление ударной воздушной волны зависит от глубины заложения заряда, величины забойки, диаметра заряда и других факторов. При взрывании удлиненного заряда в скважине заглубление колонки заряда ведет к уменьшению давления в воздушной волне, которая сказывается до определенной глубины.

Еще более снижается давление ударных воздушных волн при использовании забойки. Влияние забойки проявляется при ее длине до 20 диаметров скважины, а наибольший эффект дают первые 1,5-2 м. При увеличении диаметра заряда увеличивается избыточное давление на фронте волны.

В некоторых случаях необходимо учитывать особенности рельефа местности. При наличии препятствий имеет место ослабление интенсивности ударной воздушной волны за препятствием или усиление ее перед ним. Причем, как ослабление, так и усиление проявляется на расстояниях, не превышающих высоты препятствий.

Более существенное влияние на интенсивность ударных воздушных волн, не всегда поддающееся прогнозированию, оказывают метеорологические условия. Плотность, температура, давление и влажность атмосферы, скорость и направление ветра непрерывно изменяются во времени и пространстве, что сказывается на характере распространения ударных воздушных волн. При определенной совокупности погодных условий распространяющаяся волна может отклоняться к земле и от земли. Причем температура изменения в атмосфере могут иметь решающее влияние на характер распространения ударных воздушных волн.

Если температура понижается с увеличением высоты, то это приводит к уменьшению скорости звука по высоте. Такой случай отрицательного температурного градиента является нормальным и наиболее благоприятным при проведении взрывов, так как распространение воздушных волн происходит вверх в атмосферу без преломления к земле и отражения от нее. Если же температура воздуха повышается с высотой, т. е. имеет место случай положительного температурного градиента или температурной инверсии, происходит отклонение ударных воздушных волн обратно к земле и возможно их фокусирование.

Скорость ударной волны относительно земной поверхности увеличивается на величину скорости ветра. Как правило, в нижних слоях атмосферы скорость ветра существенно меньше скорости звука. Увеличение скорости ветра с высотой может привести к наклону ударной волны к поверхности Земли, в результате чего может произойти нерегулярное отражение ударных волн и образование головной волны с увеличенным давлением на ее фронте.

Таким образом, влияние метеоусловий может привести к аномальному проявлению воздействия ударных воздушных волн на здания и сооружения, в том числе и на значительных расстояниях от мест производства взрывных работ. В практике взрывных работ имели место случаи, когда разрушение застекления происходило на расстояниях 5-ти и более километров от места их проведения, в то время как нарушения близко расположенных объектов не наблюдалось.

Многообразие факторов, определяющих интенсивность УВВ, некоторые исследователи учитывают введением в расчетные формулы дополнительных эмпирических коэффициентов. Однако неопределенность исходных характеристик при увеличении количества факторов снижает точность расчетов, что делает неэффективным применение таких методик и реальным возможные нарушения застекления объектов ударными волнами в сложных условиях. Поскольку изменение влияющих факторов носит случайный характер, целесообразно рассмотреть вопрос с позиции теории вероятностей и математической статистики.

При исследовании закономерностей распространения и затухания ударных воздушных волн на карьерах применялась регистрация избыточного давления на фронте ударной волны, как в отдельных точках, так и по профильным направлениям. Рельеф местности на пути распространения УВВ был представлен относительно ровной поверхностью без резко выраженных препятствий.

По данным инструментальных измерений изменение давления на фронте ударной воздушной волны ΔP от расстояния характеризуется зависимостью вида:

$$\Delta P = \frac{K}{R^n}, \quad (1)$$

где ΔP – изменение давления на фронте ударной воздушной волны, Па;

K – эмпирический коэффициент, учитывающий факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны;

R – расстояние до взрыва, м;

n – показатель степени затухания ударных воздушных волн с расстоянием.

Анализ результатов измерений показал, что величина показателя n близка к единице. По мере накопления экспериментальных данных компьютерному анализу были подвергнуты в совокупности все измерения. Полученная зависимость графически представлена на рисунке 1, а величина показателя n здесь равна 0,91. Для практических расчетов без значительной потери точности можно принять $n = 1$.

Зависимость избыточного давления от массы заряда на степень затухания с учетом формулы (1) имеет вид:

$$\Delta P = KR^{-n}Q^m, \quad (2)$$

где Q – масса заряда в группе, кг;

m – эмпирический коэффициент, отражающий влияние массы заряда.

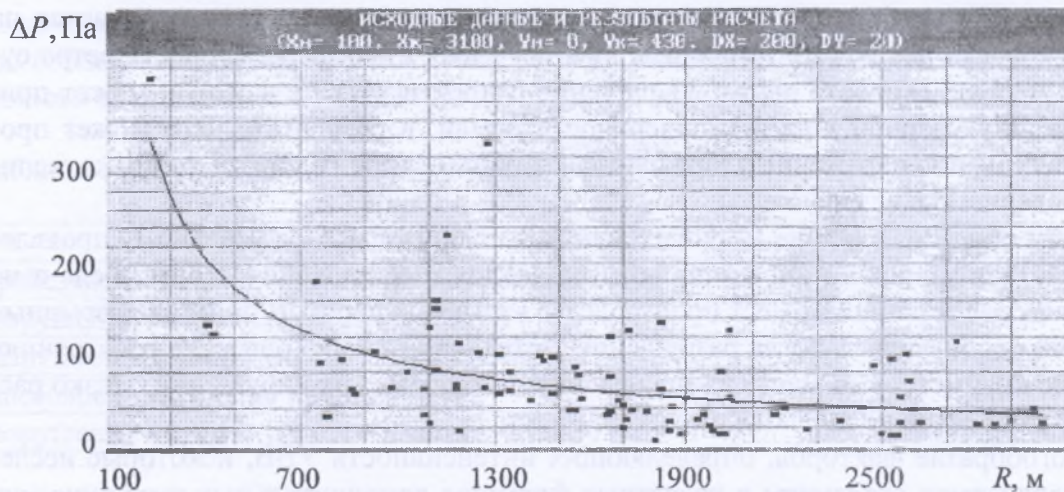


Рисунок 1 – Зависимость избыточного давления на фронте воздушной ударной волны от расстояния

В результате математической обработки экспериментальных данных с использованием метода Брандона получена зависимость:

$$\Delta P = 1,149 \cdot 10^{-2} \cdot Q^{0,6}. \quad (3)$$

Без существенных потерь в точности, заменив в данной формуле показатель степени при Q на 0,5, и с учетом (1), окончательно получим:

$$\Delta P = \frac{1260 \sqrt{Q}}{R}. \quad (4)$$

Формула (3) является удобным приближением для оценки избыточного давления на фронте УВВ, однако для определения вероятной интенсивности ударной волны с заданной надежностью необходимо теоретическое и экспериментальное обоснование расчетных параметров в исходной формуле и их возможных вариаций.

Как мы уже упоминали выше, значение показателя затухания в формуле (1) близко к единице. В свою очередь, влияние массы заряда можно характеризовать показателем приближенно равным 1/2. Если в расчетах принимать установленные их приближенные значения, то без существенных потерь точности их возможные отклонения от истинного значения можно учесть вариацией коэффициента пропорциональности в вышеприведенной зависимости, распределение которого комплексно характеризует многообразие случайных факторов.

Изучение распределения этого коэффициента позволяет с заданной точностью осуществлять прогноз интенсивности воздушных волн, что особенно важно при производстве взрывных работ вблизи жилых массивов крупных городов с большим скоплением людей и значительной площадью застекления, лечебных и детских учреждений. В результате измерений получено следующее распределение коэффициента интенсивности ударной волны по частотам (рисунок 2).

Аппроксимация экспериментальных данных различными типами распределений показала, что наилучшей моделью является гамма-распределение, функция плотности вероятности которой имеет вид:

$$f(K) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} K^{\eta-1} e^{-\lambda K}, \quad (5)$$

где λ – параметр масштаба;
 η – параметр формы;
 e – основание натуральных логарифмов.

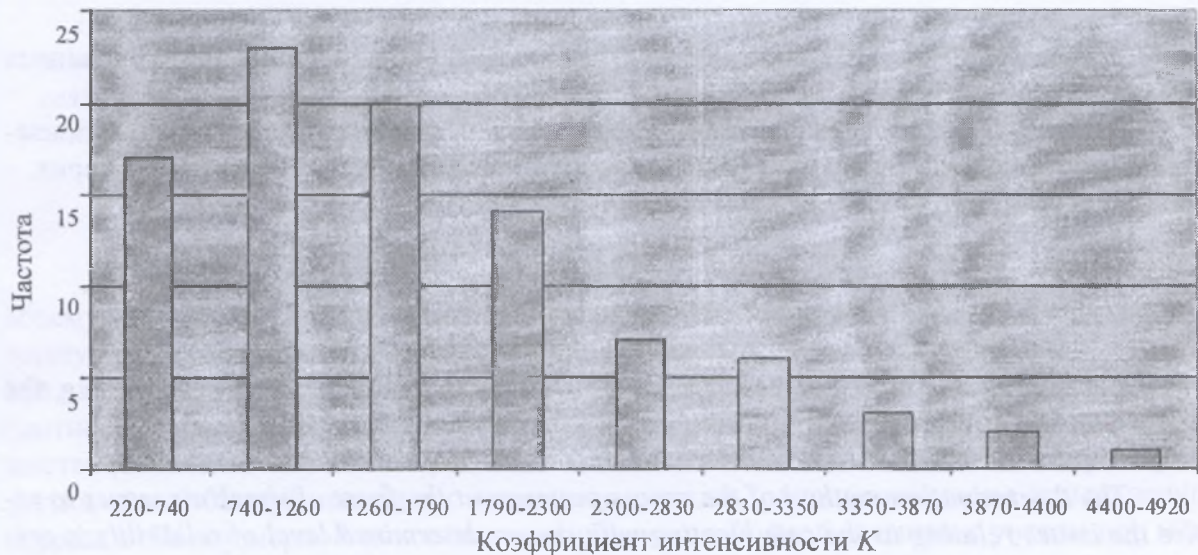


Рисунок 2 – Гистограмма распределения коэффициента интенсивности УВВ

Параметры масштаба λ и формы η вычисляются по опытным данным базы данных с использованием формул статистики:

$$\lambda = \frac{\bar{K}}{S^2}, \quad (6)$$

$$\eta = \left(\frac{\bar{K}}{S} \right)^2, \quad (7)$$

где \bar{K} – среднее значение коэффициента интенсивности ударной воздушной волны;
 S – стандартное отклонение.

Применительно к опытным данным, вычисленные значения параметра формы и масштаба составляют 2,6 и 1,68 соответственно. Критерий Пирсона для 5 % уровня значимости не превышает 1,4, что значительно меньше его табличного значения ($\chi^2_{\text{табл}} = 12,6$ при 6-ти степенях свободы). Следовательно, полученные экспериментальные данные распределения коэффициента интенсивности ударных волн не противоречат гамма-распределению. Следует отметить, что аппроксимация полученного распределения коэффициента интенсивности другими типами распределений в широком диапазоне горнотехнических условий дает худшие результаты. Например, для распределения Вейбулла критерий $\chi^2_{\text{табл}}$ равен 2,0, что ближе к его предельному табличному значению.

Заключение

Установленные закономерности распространения и затухания УВВ и распределения коэффициента интенсивности являются теоретической основой для решения задач безопасности взрывных работ по действию УВВ на объекты с заданным уровнем надежности.

Список цитированных источников

1. Цейтлин, Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
2. Оника, С.Г. Определение параметров взрывных работ и расстояний, безопасных по действию сейсмических и ударных воздушных волн / С.Г. Оника, В.А. Гаврик. – Кривой Рог: НИГРИ, 1995. – 27 с.

Onika S.G., Khalyavkin F.G., Berezovsky N.I.

Determination of the excess pressure at the front shock air waves during the blastings at the opencast working.

The determination method of the excess pressure at the front of shock air waves to resolve the issues relating to the safe blasting with the predetermined level of reliability is presented in the article.

Поступила в редакцию 03.02.2011 г.