

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Приведены результаты исследований параметров ударных воздушных волн (УВВ) при взрывах наружных, скважинных и шпуровых зарядов, зарядов выброса и сброса на земной поверхности, а также при подводных взрывах. Предложены формулы для расчета безопасных расстояний по действию УВВ на земной поверхности на основе определения массы эквивалентного заряда при взрывах различного назначения.

Ключевые слова: ударные воздушные волны, эквивалентный заряд, безопасные расстояния.

Введение

Ударные воздушные волны (УВВ), являясь одним из проявлений взрыва, представляют потенциальную опасность для людей и зданий и сооружений. Степень повреждения зависит от интенсивности УВВ. Сильные УВВ, вызывающие разрушение конструкций зданий и сооружений и наносящие повреждения механизмам и оборудованию, реализуются, как правило, в близкой от заряда области. Слабые УВВ (к ним, согласно [1], относятся волны, избыточное давление на фронте которых не превышает 10^4 Па), ответственные за разрушение застекления и легкие повреждения конструктивных элементов сооружений, реализуются на больших расстояниях от места взрыва.

Весьма разнообразны виды и способы производства взрывных работ на земной поверхности, осуществляемых при разработке полезных ископаемых и в строительстве (взрывы наружных, скважинных и шпуровых зарядов, зарядов выброса и сброса, а также взрывы этих зарядов, осуще-

ствляемые в подводных условиях). Достаточно разнообразны и способы, используемые для снижения интенсивности УВВ и уменьшения их поражающего воздействия на охраняемые объекты (засыпка наружных зарядов, укрытие мест взрывов, короткозамедленное взрывание и т.д.).

На параметры и условия распространения слабых УВВ оказывают влияние самые различные факторы, к основным из которых относятся: сложившиеся на момент взрыва метеоусловия (температурные градиенты по высоте, скорость и направление ветра и др.), физико-технические свойства взрываемых пород и материалов, наличие преград на пути распространения волны, положение зарядов относительно охраняемых объектов, буровзрывные параметры и др. Все эти факторы оказывают разное влияние на параметры УВВ и трудно выявить степень влияния каждого из них. Поэтому основным методом установления количественных зависимостей для прогнозирования параметров УВВ при взрывах на земной поверхности являются прямые инструментальные измерения.

Выполненные исследования позволили не только получить зависимости для расчета основных параметров слабых УВВ при взрывах на открытых горных работах и в строительстве, но и предложить формулы для расчета этих параметров, а также разработать единую методику расчета безопасных расстояний по действию УВВ на охраняемые объекты и людей при производстве различных видов взрывных работ на земной поверхности.

1. Параметры УВВ при взрывах наружных зарядов

Инструментальные исследования параметров слабых УВВ при взрывах наружных зарядов проводились с использованием специально разработанной аппаратуры [2]. За время их проведения было зарегистрировано более 1000 опытных полигонных и производственных взрывов при

дроблении различных пород (приведены в таблице 1) в диапазоне расстояний от 15 до 4800 м. Масса мгновенно взрывающихся зарядов изменялась от 1 до 840 кг.

По результатам этих исследований была выявлена явная зависимость величины избыточного давления на фронте УВВ от физико-технических свойств взрывающихся пород и от метеоусловий.

Результаты измерений давления УВВ в прямой волне (т.е. в волне, зарегистрированной на достаточно близком от заряда расстоянии, составляющем от нескольких метров до нескольких сотен метров, где метеоусловия и др. факторы не оказывают влияния на условия ее распространения) и соответствующие графики, полученные при обработке результатов измерений [3], показаны на рис.1. При обработке результатов измерений породы были разделены на три группы со сходными физико-техническими характеристиками (см. табл.1).

На основании обработки экспериментальных данных получены, с обеспеченностью 84 %, зависимости для расчета основных параметров слабых УВВ при взрывах наружных (накладных) зарядов:

$$\Delta P = 4,7 \times 10^5 K_T K_M \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1,5}; \quad (1)$$

$$S_+ = 160 K_T \frac{Q^{2/3}}{r}; \quad (2)$$

$$\tau_+ = 0,65 Q^{1/6} r^{1/2} 10^{-3}; \quad (3)$$

$$E = 5,5 \times 10^4 K_T^2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{2,5} \sqrt[3]{Q}, \quad (4)$$

где ΔP — давление на фронте УВВ, Па; S_+ — удельный импульс фазы сжатия, Пас; τ_+ — время действия положи-

тельной фазы УВВ, с; E — плотность потока энергии в головной части фазы сжатия УВВ, Дж/м²; Q — масса наружного заряда, кг; K_M — коэффициент метеоусловий; K_T — коэффициент, учитывающий влияние физико-технических свойств взрывааемых пород и материалов на интенсивность УВВ; его значения приведены в табл. 1.

Для предотвращения вредных эффектов УВВ необходимо учитывать влияние метеоусловий. С этой целью в расчетную формулу (1) введен коэффициент K_M , учитывающий возможность появления неблагоприятных для производства взрывных работ метеоусловий, когда $K_M > 1$.

Таблица 1

Значения коэффициента K_T в зависимости от влияния физико-технических свойств взрывааемых горных пород и строительных материалов на интенсивность УВВ

| Группа пород | Наименование пород | Коэффициент крепости | Категория пород по СНиП | Категория пород по взрываемости | Коэффициент K_T |
|--------------|--|----------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|
| I | Песчаники, сланцы, мел, доломит, известняк, выветрелые серпентиниты и перидотиты, мерзлые грунты | до 8 | до VI | I-II | 0,5 |
| II | Крепкие известняки, grano-диориты, некрепкий гранит, гранито-гнейсы, серпентиниты, перидотиты, талькокарбонатные породы; кирпич, бетон | 8—12 | VI-VIII | III | 1,0 |
| III | Граниты, порфириты, кварциты, базальты, трахилипариты, диориты, габбро плотные, серпентинизированный перидотит; крепкий бетон, железобетон | 12-20 | IX-XI | IV-V | 1,6 |

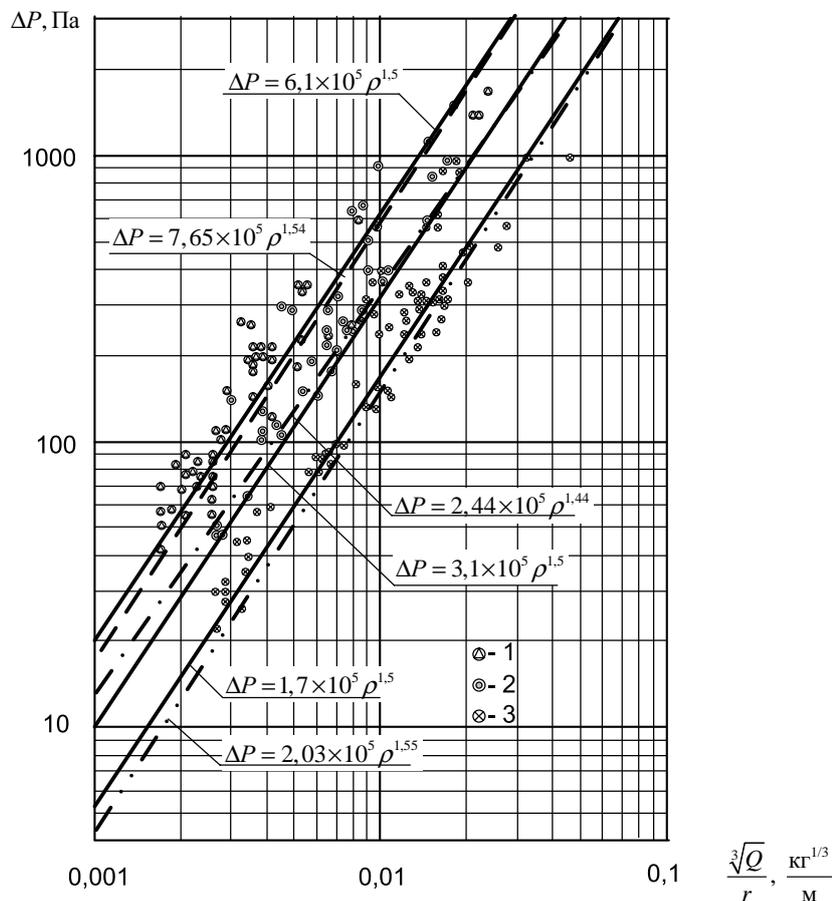


Рис. 1. Графики зависимости $\Delta P = f\left(\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)$ при взрывах наружных зарядов:
 1 — породы III группы по табл.1; 2 — породы II группы; 3 — породы I группы

Значения коэффициента K_M зависят от сложившихся метеоусловий и расстояния между местом взрыва и рассматриваемой точкой. На малых расстояниях влияние метеоусловий сказывается незначительно, т.к. уменьшается воздействие аномальных и фокусирующих профилей градиентов скорости звука, приводящих к усилению УВВ [4].

Таблица 2

Значения коэффициента K_M

| Сезон | Расстояние | | |
|------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|
| | до 200 м | от 200 м до 2000 м | более 2000 м |
| Летний (с апреля по октябрь) | 1 | $3\left(\frac{r}{2000}\right)^{1/2}$ | 3 |
| Зимний (с ноября по март) | 1 | $5\left(\frac{r}{2000}\right)^{1/2}$ | 5 |

В результате статистической обработки метеоданных для летних месяцев (к ним отнесены месяцы с положительной среднемесячной температурой воздуха) с обеспеченностью 98 % получены значения коэффициента метеоусловий, приведенные в табл. 2. Зимой (месяцы с отрицательной среднемесячной температурой воздуха) значение коэффициента K_M следует увеличить в 1,7 раза, если расстояние между местом взрыва и рассматриваемой точкой составляет более 200 м [5].

2. УВВ при взрывах скважинных и шпуровых зарядов

Для оценки параметров УВВ при взрывах скважинных и шпуровых зарядов, зарядов выброса и сброса, а также при взрывах подводных зарядов можно использовать формулы (1)...(4), если под Q понимать массу эквивалентного заряда $Q_{\text{э}}$, т.е. массу наружного заряда, размещенного на поверхности абсолютно жесткого полупространства, эквивалентную по интенсивности излучения УВВ взрыву соответствующего заряда.

Для определения массы эквивалентного заряда в случае взрыва скважинных зарядов была проведена инструментальная регистрация давления в УВВ при взрывах скважинных зарядов разной длины, полностью (до устья), заполненных ВВ [6,7]. Полученные результаты сравнивались с пара-

метрами УВВ взрывов наружных зарядов и определялась соответствующая масса эквивалентного заряда. Было установлено, что в случае достаточной длины одиночного цилиндрического заряда общая масса заряда в скважине не играет большой роли во внешних эффектах взрыва, важна масса ВВ в одном метре выработки (т.н. линейная плотность заряда).

Для данного диаметра скважины эквивалентную массу одиночного скважинного заряда Q_3^1 можно выразить через диаметр и линейную плотность заряда

$$Q_3^1 = Kpd, \quad (5)$$

где d — диаметр скважины, м; p — линейная плотность заряда, кг/м.

На основании инструментальных исследований было установлено, что при $l_{зар}/d < 20$ коэффициент K возрастает с увеличением длины заряда, а при $l_{зар}/d > 20$ достигает значения $K=12$ и при дальнейшем увеличении относительной длины заряда остается постоянным (рис. 2). При малых длинах заряда (длина заряда $l_{зар} < 12d$) массу эквивалентного заряда с некоторым запасом можно принять равной фактической массе Q .

Для учета влияния забойки скважины в формулу (5) следует ввести коэффициент K_3 , учитывающий влияние забойки скважинного заряда на интенсивность УВВ (при полном заполнении скважины зарядами ВВ до устья коэффициент $K_3 = 1,0$).

Для оценки величины коэффициента K_3 был выполнен ряд экспериментов [6,7], при которых сравнивалось давление в УВВ при взрыве скважинных зарядов с грунтовой и воздушной забойкой разной длины с давлением в УВВ при взрывах скважинных зарядов, полностью (до устья) заполненных ВВ (рис.3). Величина коэффициента K_3 , с учетом формулы (1), определялась как

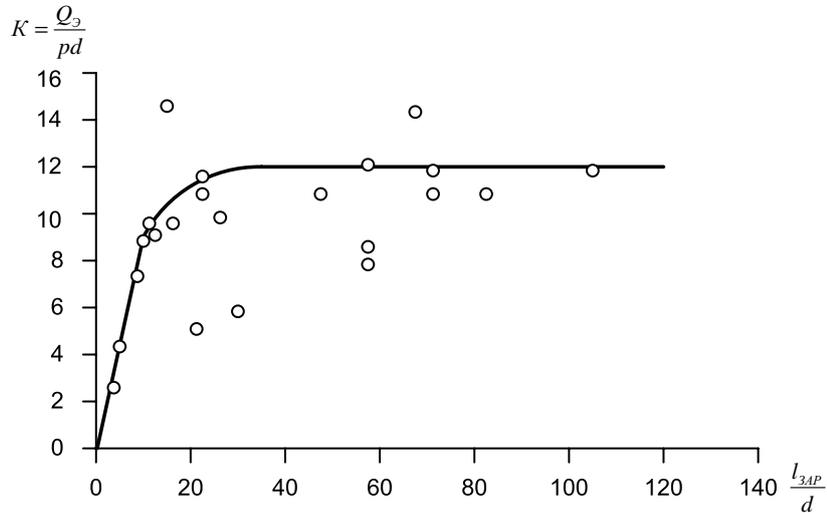


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K = \frac{Q_3}{pd}$ от относительной длины заряда l_{3ap}/d

$$K_3 = \left(\frac{\Delta P_{3AB}}{\Delta P_{ОСКВ}} \right)^2, \quad (6)$$

где ΔP_{3AB} — давление на фронте УВВ при взрыве скважинного заряда с забойкой определенной длины, Па; $\Delta P_{ОСКВ}$ — давление на фронте УВВ при взрыве скважинного заряда, полностью (до устья) заполняющего скважины, Па.

Проведенные исследования показали, что зависимость $\frac{\Delta P_{3AB}}{\Delta P_{ОСКВ}} = f\left(\frac{l_3}{d}\right)$ для скважинных зарядов длиной $l_{3ap} \geq 20d$ (где d — диаметр скважины) можно описать одной кривой независимо от длины скважины (кривая 1 для грунтовой забойки и кривая 4 для воздушной забойки на рис. 3). Для скважин меньшей длины эти кривые лежат ниже (на рис. 3 для грунтовой забойки — кривые 2 и 3).

В диапазоне $0 \leq \frac{l_3}{d} \leq 15$ кривая 1 (грунтовая забойка) описывается формулой $\frac{\Delta P_{ЗАБ}}{\Delta P_{ОСКВ}} = e^{-\frac{l_3}{5d}}$, а кривая 4 (воздушная забойка) — формулой $\frac{\Delta P_{ЗАБ}}{\Delta P_{ОСКВ}} = e^{-\frac{l_3}{7d}}$.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов установлено, что, начиная с длины скважинного заряда $20d$ и больше, интенсивность УВВ при взрывах зарядов с забойкой зависит от относительной длины забойки и не зависит от длины заряда. С другой стороны, при длине

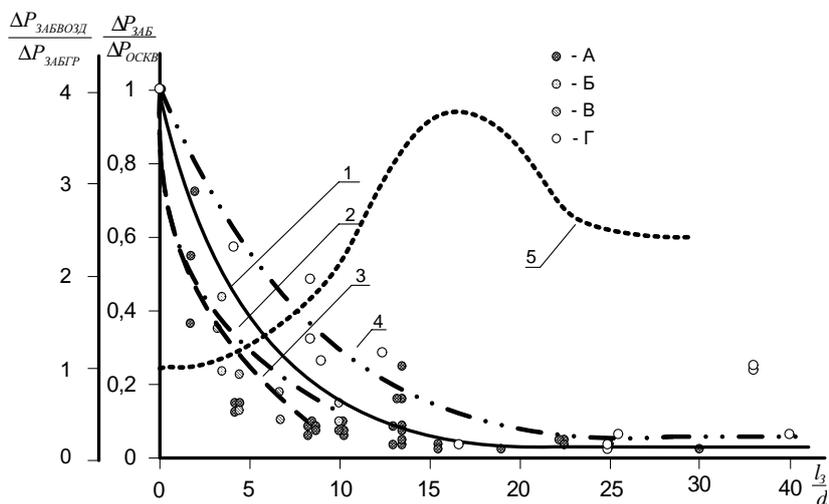


Рис. 3. Зависимости снижения давления в УВВ при взрывании скважинных зарядов от относительной длины забойки l_3/d :

1 — грунтовая забойка, скважины длиной 3,3...22,5 м (длина заряда в скважине более 20 диаметров); 2 — грунтовая забойка, скважины длиной 2,3 м; 3 — грунтовая забойка, скважины длиной 1,2 м; 4 — воздушная забойка; 5 — относительная эффективность грунтовой забойки по сравнению с воздушной забойкой; А — длина заряда в скважине более 20 диаметров; Б — скважины длиной 2,3 м; В — скважины длиной 1,2 м; Г — скважины с воздушной забойкой

заряда в скважине $l_{СКВ} < 20d$ роль забойка увеличивается при уменьшении длины заряда.

Из сравнения кривых 1 и 4 графика рис.3 видно, что применение грунтовой забойки эффективнее снижает давление в УВВ по сравнению с применением воздушной забойки. При длине забойки 15...20 диаметров эффективность применения грунтовой забойки (кривая 5) для снижения давления в УВВ в 3,5 раза превышает эффективность воздушной забойки.

При длине забойки более 25 диаметров эффективность грунтовой забойки по сравнению с воздушной практически не изменяется.

Таким образом, для снижения давления в УВВ грунтовую забойку целесообразно применять при длине забойки $l_3 < 25d$, при большей длине верхней незаряженной части скважины забойку грунтом можно не осуществлять. С другой стороны, длина грунтовой части забойки в скважине должна быть не менее 15 диаметров заряда.

При иницировании скважинных зарядов от магистральной сети ДШ, сама сеть ДШ представляет собой дополнительный наружный заряд. С учетом энергетического сложения УВВ от отдельных скважинных зарядов масса эквивалентного заряда группы скважинных зарядов с забойкой определяется как

$$Q_{\text{э}} = 12pdK_3m + Q_{\text{ДШ}} \text{ при } l_{\text{зар}} \geq 12d; \quad (7)$$

$$Q_{\text{э}} = Q_1K_3m + Q_{\text{ДШ}} \text{ при } l_{\text{зар}} < 12d, \quad (8)$$

где $Q_{\text{э}}$ — масса эквивалентного заряда, кг; p — линейная плотность заряда, кг/м; d — диаметр заряда, м; m — число одновременно взрываемых скважинных зарядов; $Q_{\text{ДШ}}$ — суммарная масса заряда ВВ в наружной сети ДШ, кг; $l_{\text{зар}}$ — длина заряда, м; K_3 — коэффициент забойки; его значения в зависимости от относительной длины забойки и материала забойки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента забойки K_3

| Забойка | Значение K_3 при отношении длины забойки к диаметру заряда l/d | | | | | |
|-----------|--|------|------|-------|-------|------------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 и более |
| Грунтовая | 1 | 0,15 | 0,02 | 0,003 | 0,002 | 0,001 |
| Воздушная | 1 | 0,3 | 0,07 | 0,02 | 0,004 | 0,002 |

Подставляя значения $Q_{\text{э}}$, рассчитанные по формулам (7) или (8), в формулы (1)...(4), можно получить зависимости для расчета основных параметров слабых УВВ при взрывах скважинных зарядов.

Взрывы шпуровых зарядов сравнительно широко используются при производстве различных видов специальных взрывных работ, а также для дробления негабарита на карьерах.

В случае взрывов шпуровых зарядов для определения величины избыточного давления на фронте УВВ, как и в случае взрыва скважинных зарядов, можно пользоваться выражением (1) при известной массе эквивалентного заряда $Q_{\text{эш}}$. На основании результатов прямой регистрации давления в УВВ при взрывах шпуровых зарядов, полностью (до устья) заполненных ВВ, была определена масса шпурового заряда, эквивалентная по интенсивности излучения УВВ взрыву наружного заряда [8]

$$Q_{\text{эш}} = 0,25Q_{\text{ш}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{ш}}$ — фактическая масса взрывааемых шпуровых зарядов, кг.

Масса эквивалентного заряда в случае взрыва шпуров с забойкой и при их инициировании ДШ определяется выражением

$$Q_{\text{эш}} = 0,25Q_{\text{ш}}K_3 + Q_{\text{дш}}, \quad (10)$$

где K_3 — коэффициент забойки, значения которого приведены в табл. 3.

Сопоставление данных, полученных при взрывах скважинных и шпуровых зарядов в породах разных групп, показало, что, как и в случае наружных зарядов (см. табл. 1), в более крепких породах интенсивность УВВ будет выше при прочих равных условиях.

В случае взрыва скважинных и шпуровых зарядов при оптимальной длине забойки (при ее длине более 15 диаметров выработки) единственным существенным источником УВВ является взрыв магистрали ДШ. При взрыве большого количества зарядов масса ВВ в сети ДШ может достигать нескольких сотен граммов. Самым эффективным средством снижения уровня воздействия УВВ при взрывах детонирующего шнура является присыпка его слоем песка [9]. Слой песка толщиной 5...8 см обеспечивает снижение давления в УВВ до трех раз. При слое песка не менее 10 см массу навески ВВ в магистрали ДШ при определении массы эквивалентного заряда по формулам (7), (8) и (10) можно не учитывать.

Снизить интенсивность УВВ также позволяет изменение способа инициирования скважинных и шпуровых зарядов. При использовании неэлектрических систем инициирования зарядов массу навески ВВ в их ударно-волновых трубках (у СИНВ-П — 0,93 г/м, у «Эдилин» — 0,015...0,035 г/м) также можно не учитывать.

3. УВВ при взрывах зарядов выброса и сброса

Взрывы выброса и сброса осуществляют с использованием сосредоточенных и удлиненных зарядов. Эквивалентную массу сосредоточенного заряда выброса или сброса можно определить по формуле

$$Q_{ЭВ} = K_{ЗВЫБР} Q, \quad (11)$$

где $Q_{ЭВ}$ — масса эквивалентного заряда, кг; $K_{ЗВЫБР}$ — коэффициент заглубления; Q — масса сосредоточенного заряда, кг.

Коэффициент $K_{ЗВЫБР}$ учитывает влияние глубины заложения заряда на интенсивность УВВ [10]. Он определяется так же, как и коэффициент забойки при взрыве скважинных зарядов (рис.4)

$$K_{ЗВЫБР} = \left(\frac{\Delta P_{ВЫБР}}{\Delta P_0} \right)^2, \quad (12)$$

где $\Delta P_{ВЫБР}$ — давление на фронте УВВ при взрыве сосредоточенного заряда выброса или сброса, Па; ΔP_0 — расчетное давление на фронте УВВ при взрыве наружного заряда такой же массы, Па.

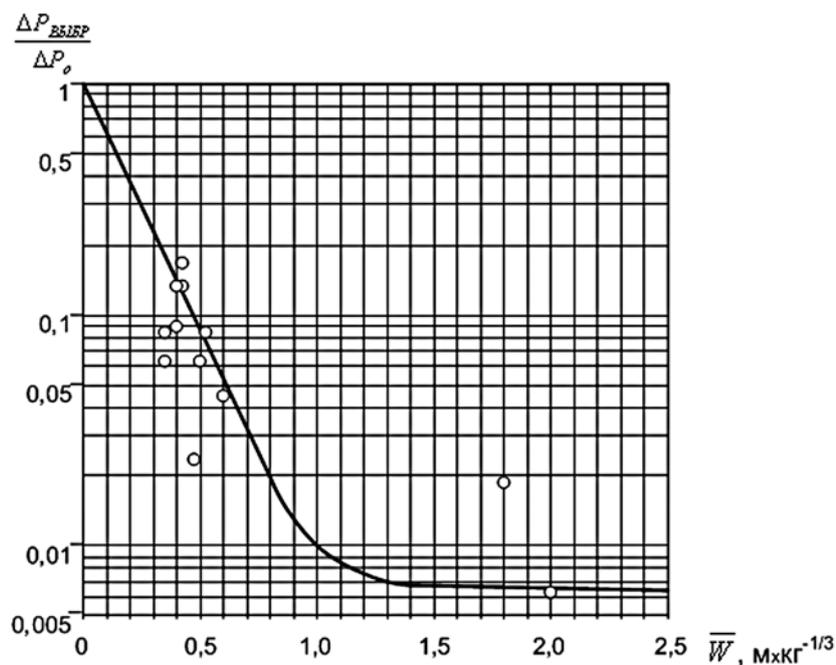


Рис. 4. График снижения давления при взрывах на выброс и сброс в зависимости от относительной глубины заложения заряда \bar{W}

Таблица 4

Значения коэффициента заглубления $K_{ЗВЫБР}$ при взрывах зарядов выброса и сброса

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|------|------|------|-------|-------|--------|--------|
| $\frac{W}{\sqrt[3]{Q}}$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,5 |
| $K_{ЗВЫБР}$ | 1,0 | 0,4 | 0,15 | 0,07 | 0,01 | 0,003 | 0,001 | 0,0005 | 0,0001 |

Значения коэффициента $K_{ЗВЫБР}$ в зависимости от приведенной глубины заложения сосредоточенного заряда

$$K_{ЗВЫБР} = f\left(\bar{W} = \frac{W}{\sqrt[3]{Q}}\right) \text{ даны в табл. 4.}$$

При расчете давления в УВВ в случае взрыва удлиненного (линейно-протяженного — рис.5) заряда в формуле (1) под Q понимается масса сосредоточенного наружного заряда Q_3 , который в данной точке обуславливает то же давление в УВВ, что и рассматриваемый удлиненный заряд.

Масса эквивалентного заряда зависит от его геометрии, а также от координат точки, в которой рассматривается эффект УВВ. Массу эквивалентного заряда в точках, в которых давление на фронте УВВ принимает экстремальные значения (см. рис. 5), можно определить по формулам

$$Q_3^A = \frac{2\gamma r}{\sqrt{1+4\left(\frac{r}{l}\right)^2}}; \quad (13)$$

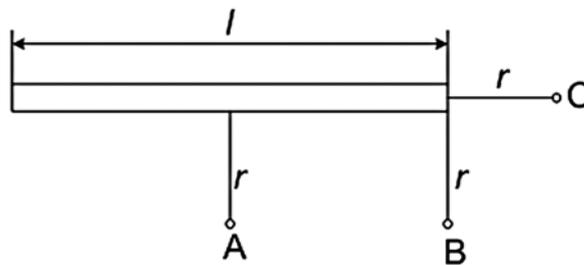


Рис. 5. Схема к расчету эквивалентной массы удлиненного заряда

$$Q_3^B = \frac{\gamma r}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2}}; \quad (14)$$

$$Q_3^C = \frac{\gamma r}{2} \left[\frac{2\frac{r}{l} + 1}{\left(1 + \frac{r}{l}\right)^2} \right], \quad (15)$$

где l — длина линейно-протяженного заряда, м; γ — линейная плотность заряда, кг/м; r — расстояние от заряда до рассматриваемой точки, м.

Если длина линейно-протяженного заряда существенно превышает расстояние до рассматриваемой точки, т.е. $l \gg r$, то из выражений (13)...(15) вытекает, что

$$Q_3^A = 2\gamma r; \quad (16)$$

$$Q_3^B = \gamma r; \quad (17)$$

$$Q_3^C = 0,5\gamma r. \quad (18)$$

Практически условия (16)...(18) выполняются при длине заряда $l = (2...5)r$. Анализ показывает, что учет влияния протяженности заряда по формулам (13)...(15) следует выполнять до расстояний менее десяти длин заряда. На больших расстояниях заряд можно рассматривать как сосредоточенный.

Влияние глубины заложения удлиненного заряда на интенсивность УВВ, аналогично взрыву сосредоточенного заряда, учитывается коэффициентом заглубления $K_{ЗВЫБР}$. При определении значений коэффициента заглубления $K_{ЗВЫБР}$ по табл. 4 под Q следует понимать массу эквивалентного заряда Q_3 , рассчитанную по формуле (16), а под r — величину ЛНС W .

$$K_{звЫБР} = f \left(\bar{W} = \frac{W}{\sqrt[3]{2\gamma W}} \right). \quad (19)$$

4. УВВ при подводных взрывах

Ударная воздушная волна при подводных взрывах образуется как вследствие преломления гидроударной волны на границе «вода — воздух», так и в результате подъема водяного купола со сверхзвуковой скоростью. Поршневое действие движущегося вверх со сверхзвуковой скоростью водяного купола обуславливает излучение еще одного типа ударной волны. Преломленная волна будет характеризоваться ничтожной амплитудой. Уже на небольших расстояниях от эпицентра взрыва, составляющих около $(20...30)R_0$ (где R_0 — радиус сферического заряда), преломленные волны по амплитуде давления приближаются к акустическим. При взрывах в мелких водоемах поршневое действие движущегося водяного купола является определяющим источником излучения ударных волн. Помимо указанных двух источников УВВ будет излучаться также при прорыве продуктов детонации через слой воды.

Аналогичные источники излучения УВВ имеют место и при взрывах в грунтах, причем наиболее существенным является прорыв продуктов детонации. Это обстоятельство использовано при расчете безопасных параметров УВВ при подводных взрывах накладных зарядов [11].

При расчете давления в УВВ взрывов подводных зарядов в формуле (1) принят повышенный показатель затухания с расстоянием ($\Delta P \sim r^{-1,5}$), поскольку заведомо предполагается, что ударные волны, инициируемые движущимся столбом воды и характеризующиеся малым коэффициентом затухания с расстоянием ($\Delta P \sim r^{-0,75}$), не будут иметь существенное значение на больших расстояниях от взрыва. На

больших расстояниях УВВ определяются прорвавшимися через толщу воды продуктами детонации. Как и в случае наземных взрывов, подводные взрывы вызывают ударные волны в воздухе, которые затухают с расстоянием с показателем затухания, приближающимся к 1,5.

Зависимость снижения давления в УВВ при взрыве накладных подводных зарядов в зависимости от относительной толщины слоя воды $\bar{H} = \frac{H}{\sqrt[3]{Q}}$ над зарядом показана на рис. 6.

Как и в случае наземных взрывов, расчет давления в УВВ на больших расстояниях при подводных взрывах может быть выполнен по формуле (1), где под Q следует понимать эквивалентную массу накладного подводного заряда $Q_{ПВ}$. Для учета влияния слоя воды над зарядом на уровень снижения интенсивности давления в ударной воздушной волне, в формулу для определения эквивалентной массы заряда вводится коэффициент $K_{зп}$ [11]. Его значение при взрывах накладных подводных зарядов можно определить по формуле

$$K_{зп} = \left(\frac{\Delta P_{ПОДВ}}{\Delta P_0} \right)^2 = 9 \times 10^{-4} \left(\frac{H}{\sqrt[3]{Q_{ПВ}}} \right)^{-3}, \quad (20)$$

где $\Delta P_{ПОДВ}$ — давление на фронте УВВ при взрыве подводного накладного заряда, Па; ΔP_0 — расчетное давление на фронте УВВ при взрыве наружного заряда такой же массы, размещенного на дневной поверхности, Па; H — высота слоя воды над зарядом, м.

Формула (20) может быть использована в диапазоне приведенных глубин $0,1 \leq \bar{H} \leq 2$.

При взрывах подводных скважинных или шпуровых зарядов, а также накладных зарядов с засыпкой под Q следует понимать массу эквивалентного заряда $Q_{\text{э}}$

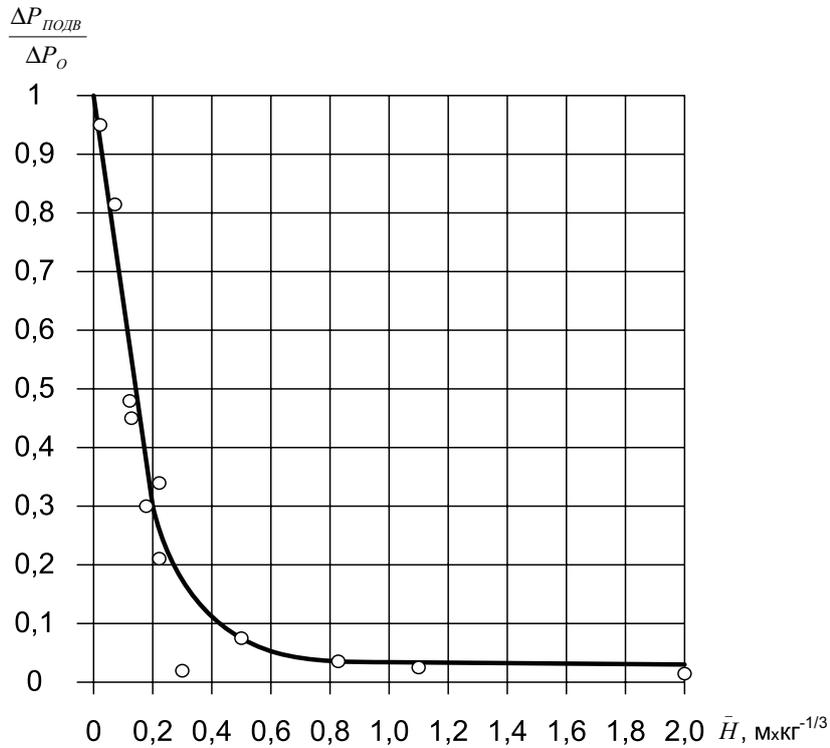


Рис. 6. График снижения давления при взрывах подводных накладных зарядов в зависимости от относительной толщины слоя воды над зарядом \bar{H}

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{пв}} K_{\text{зп}} + Q_{\text{дш}}, \quad (21)$$

где $Q_{\text{пв}}$ — масса эквивалентного заряда подводного взрыва, кг; при взрывании подводного наружного заряда, размещенного на дне водоема, равна его фактической массе; при взрывании подводных скважинных зарядов определяется по формулам (7) и (8); при взрывании подводных шпуровых зарядов определяется по формуле (10); $Q_{\text{дш}}$ — суммарная масса заряда ВВ в сети ДШ, размещенной на дневной поверхности, кг.

5. Мероприятия по снижению интенсивности УВВ

В настоящее время весьма эффективным средством расширения возможностей применения взрыва является короткозамедленное взрывание (КЗВ). Использование КЗВ не только способствует повышению качества взрывных работ, но и снижает степень воздействия сейсмических и ударных воздушных волн (УВВ) на сооружения.

При короткозамедленном взрывании зарядов образуется несколько следующих друг за другом импульсов УВВ. Характер взаимодействия воздушных волн определяется интервалом замедления и расстоянием между группами. При достаточном интервале замедления число волн соответствует числу групп зарядов, а давление на фронте УВВ можно определить по формуле (1) для каждой группы КЗВ. Если интервалы замедления между группами малы, а расстояние от каждой группы зарядов до точки наблюдения меняется незначительно, то образуется одна волна, а взрыв можно рассматривать как мгновенный, у которого масса заряда равна суммарной массе зарядов всех групп.

В случае короткозамедленного взрывания прямолинейной серии зарядов (например, при взрывании вытянутого блока по поперечной или диагональной схемам КЗВ), возможно усиление УВВ в направлении распространения детонации по блоку за счет догона или синхронного сложения УВВ от отдельных групп зарядов. Степень увеличения интенсивности УВВ зависит от числа групп зарядов и расстояний между зарядами и между пунктом регистрации и ближайшим зарядом.

Для избежания явления наложения и направленного действия УВВ при КЗВ интервал замедления между группами прямолинейно расположенных зарядов должен выбираться исходя из следующих условий [12]:

- при инициировании со стороны охраняемого объекта

$$t_3 = \tau_+ - 0,003l ; \quad (22)$$

- при инициировании со стороны, противоположной охраняемому объекту

$$t_3 = \tau_+ + 0,003l , \quad (23)$$

где t_3 — интервал замедления, с; τ_+ — продолжительность положительной фазы УВВ в районе охраняемого объекта, с; l — расстояние между зарядами, м.

К снижению интенсивности УВВ при взрывании скважинных и шпуровых зарядов приводит использование защитных укрытий мест взрыва. Применение укрытий типа домиков, сплошных щитовых газонепроницаемых металлических или деревянных укрытий и других, обеспечивающих безопасность по разлету кусков взорванной породы, позволяет снизить давление в УВВ в два-три раза [13]. При использовании в качестве укрытия передвижного локализатора санного типа давление в УВВ снижается в полтора-два раза. Длина забойки при этом должна составлять не менее 10 диаметров заряда.

Использование газопроницаемых укрытий (металлической сетки типа Рабица, решеток и др.) не приводит к существенному снижению интенсивности УВВ.

При обрушении сооружений в случае необходимости существенного снижения интенсивности УВВ между деревянными щитами укрытий и обрушаемым сооружением устраивается засыпка из инертного материала. В случае взрывов наружных зарядов достаточен слой песка толщиной 0,5 м. При укрытии магистрали ДШ хороший результат (практически полную локализацию УВВ) обеспечивает слой мокрых опилок толщиной 0,5 м или слой песка толщиной 0,3 м.

Для уменьшения интенсивности УВВ при взрывах наружных зарядов наиболее эффективным средством является засып-

Таблица 5

Значения коэффициента K_H

| | | | | | | | | | | |
|--------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| h_{3H}/h_0 | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 |
| K_H | 1,0 | 0,75 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,03 | 0,02 |

ка заряда. В качестве засыпки обычно используют материал, имеющийся на месте производства работ. Применение засыпки уменьшает долю энергии ВВ, идущую на образование УВВ. Это происходит за счет увеличения времени действия ПВ на массив и, как следствие, снижения их первоначального давления, а также за счет расхода энергии ВВ на метание засыпки.

Влияние засыпки наружного заряда на величину избыточного давления учитывается коэффициентом K_H . В этом случае масса эквивалентного заряда

$$Q_э = K_H Q. \quad (24)$$

Экспериментально установлено [14], что при высоте слоя засыпки h_{3H} , равном высоте заряда h_0 , давление в УВВ снижается на 30 %, чему соответствует коэффициент $K_H=0,5$. Чтобы при данном слое засыпки получить такое же давление, как и при взрыве заряда без засыпки, необходимо, согласно (5), увеличить массу заряда в два раза. При высоте слоя засыпки, равном $h_{3H}=2h_0$, нужно увеличить массу заряда в 3 раза.

Значения коэффициента K_H в зависимости от отношения высоты слоя засыпки h_{3H} к высоте заряда h_0 при использовании в качестве засыпки песка приведены в табл. 5.

6. Расчет безопасных расстояний по действию УВВ на земной поверхности

Наиболее слабым конструктивным элементом сооружений является застекление. Повреждение застекления происходит уже под воздействием слабых УВВ, расчет основных параметров которых производят по формулам (1)...(4).

Согласно существующим в настоящее время представлениям, повреждение застекления сооружений под воздействием УВВ происходит при достижении на ее фронте критического уровня давления или удельного импульса в фазе сжатия [15]. При определении критерия опасности определяющий параметр ударной волны и характер нагрузки зависят от соотношения времени действия положительной фазы УВВ τ_+ и собственного периода колебаний конструкции T_0 . При $\tau_+ \leq 0,25T_0$ реакция на нагрузку пропорциональна удельному импульсу фазы сжатия S_+ . В этом случае критерием опасности является удельный импульс. При $\tau_+ \geq 10T_0$ механическое действие УВВ определяется величиной максимального избыточного давления ΔP на фронте УВВ, а повреждение застекления происходит при превышении критического значения избыточного давления.

Период собственных колебаний стекла, обычно применяемого при застеклении зданий предприятий, диспетчерских пунктов цехов, жилых зданий и др. составляет $T_0 = 20 \dots 40$ мс. Следовательно, для застекления импульсный характер нагрузки будет наблюдаться при $\tau_+ \leq 10$ мс, а статическое действие при $\tau_+ \geq 200$ мс.

Взрывные работы на строительстве и реконструкции предприятий ведутся, как правило, вблизи охраняемых объектов. Время действия положительной фазы УВВ мало, составляет обычно несколько миллисекунд. Следовательно, повреждение застекления охраняемых объектов в близкой зоне происходит при превышении критического значения удельного импульса фазы сжатия в УВВ. При взрывании вне помещений, а также при обрушении сооружений, в зону действия УВВ взрыва могут попасть объекты, расположенные на расстоянии несколько сотен метров. Здесь (на расстоянии от места взрыва 200 м и более) критерием опасности для застекления принято избыточное давление на фронте УВВ.

Экспериментально установлено [16], что в ближней зоне взрыва повреждение застекления происходит при воздействии удельного импульса фазы сжатия УВВ свыше 4,5 Пас. В качестве предельно допустимого принимается значение удельного импульса $S_+ = 2,5$ Пас. В средней (расстояние более 200 м) и дальней зонах взрыва повреждение застекления происходит при избыточном давлении на фронте УВВ, равном 1000...2000 Па. В качестве предельно допустимого для застекления из обычных стекол принято значение избыточного давления $\Delta P = 500$ Па.

Предельно допустимые значения избыточного давления и удельного импульса устанавливаются исходя из принятой степени безопасности.

В «Единых правилах безопасности при взрывных работах» [17] при расчете расстояний, безопасных по действию ударной воздушной волны взрыва, предусмотрено пять степеней безопасности в зависимости от вида возможных повреждений. Применительно к действию УВВ на застекление при производстве взрывных работ в строительстве и на открытых горных работах речь может идти о первых трех степенях безопасности, причем вторая (случайные повреждения застекления) и третья (полное разрушение застекления; частичное повреждение рам, дверей, нарушение штукатурки и внутренних легких перегородок) степени безопасности, когда возможно повреждение застекления, допустимы лишь в отдельных исключительных случаях. При производстве регулярных взрывных работ допускается лишь первая степень безопасности — отсутствие повреждений. Каждой степени безопасности соответствуют определенные предельно допустимые величины нагрузок на застекление, при превышении которых возможно повреждение застекления, соответствующее более низкой степени безопасности.

Предельно допустимые значения избыточного давления и удельного импульса фазы сжатия в зависимости от степени безопасности и виды повреждения застекления приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Предельно допустимые значения избыточного давления
и удельного импульса для застекления**

| Степень безопасности | Возможные повреждения застекления | Избыточное давление ΔP , Па | Удельный импульс фазы сжатия S_+ , Пас |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | Отсутствие повреждений | 500 | 2,5 |
| 2 | Случайные повреждения | 1500 | 4,5 |
| 3 | Полное разрушение | 5000 | 20,0 |

Как указано выше, в средней и дальней зонах взрыва критерием опасности для застекления является избыточное давление на фронте УВВ, а в ближней зоне взрыва (на расстоянии 200 м и ближе) — удельный импульс фазы сжатия.

При принятых для первой степени безопасности предельно допустимых значениях избыточного давления $\Delta P=500$ Па и удельного импульса $S_+=2,5$ Пас следует, что критерий избыточного давления применим в средней и дальней зонах (расстояния 200 м и более от места взрыва) при расчете радиуса опасной зоны взрыва зарядов массой $Q_{\text{Э}} \geq 2,0$ кг. Критерий удельного импульса можно использовать при расчете радиуса опасной зоны в ближней зоне (расстояние менее 200 м от места взрыва) взрыва малых масс зарядов ($Q_{\text{Э}} < 2,0$ кг).

Формулы для расчета радиуса опасной зоны должны учитывать зависимость коэффициента метеоусловий от сезона проведения взрывных работ и расстояния. Тогда из формул (1) и (2) при $\Delta P_{\text{доп}}=500$ Па и $S_{+\text{доп}}=2,5$ Пас для летнего сезона получим выражения для определения радиуса опасной зоны по действию УВВ на застекление (первая степень безопасности — отсутствие повреждений [17])

$$r_6 = 200 K_T^{2/3} Q_{\text{Э}}^{1/3} \text{ при } Q_{\text{Э}} \geq 1000 \text{ кг}; \quad (25)$$

$$r_6 = 65 K_T Q_{\text{Э}}^{1/2} \text{ при } 2 \text{ кг} \leq Q_{\text{Э}} \leq 1000 \text{ кг}; \quad (26)$$

$$r_6 = 63 K_T Q_{\text{Э}}^{2/3} \text{ при } Q_{\text{Э}} < 2 \text{ кг}. \quad (27)$$

Зимой безопасные расстояния, рассчитанные по формулам (25) и (26), должны быть увеличены в 1,5 раза, если $Q_{\text{Э}} \geq 2,0$ кг.

В зависимости от метода производства взрывных работ масса эквивалентного заряда $Q_{\text{Э}}$ рассчитывается по формулам:

- при взрывах наружных зарядов с засыпкой — по формуле (24);
- при взрывах шпуровых зарядов — по формуле (10);
- при взрывах скважинных зарядов — по формулам (7) и (8);
- при взрывах зарядов выброса и сброса — по формуле (11);
- при взрывах подводных зарядов — по формуле (21).

При короткозамедленном взрывании под $Q_{\text{Э}}$ следует понимать массу эквивалентного заряда одной группы. Учитывая, что взрывные работы в строительстве и при реконструкции производят главным образом в близкой зоне, где продолжительность положительной фазы УВВ не превышает 10...15 мс, можно считать, что при замедлении 25 мс и более УВВ от отдельных групп зарядов полностью разделяются. В этом случае взрыв одной группы зарядов по действию УВВ можно рассматривать как мгновенный и расчет радиуса опасной зоны вести по формуле (27). При интервале замедления между группами 10..15 мс радиус опасной зоны должен быть увеличен в 1,3 раза по сравнению с рассчитанным по формуле (27).

В средней и дальней зонах взрыва, при $Q_{\text{Э}} > 2$ кг, когда расчет радиуса опасной зоны ведется по формулам (25) и (26), при интервале замедления между группами 10..15 мс радиус опасной зоны должен быть увеличен в 1,5 раза, а при интервале замедления 20...25 мс — в 1,3 раза. При интервале замедления 50 мс радиус опасной зоны можно не увеличивать.

Размеры зон возможного повреждения застекления, соответствующие второй или третьей степени безопасности, могут быть рассчитаны по формулам (1) и (2) при известных предельно допустимых значениях избыточного давле-

ния и удельного импульса для застекления (см. табл.6) и в зависимости от величины эквивалентной массы взрываемого заряда.

При допустимости 2-й степени безопасности радиус опасной зоны, рассчитанный по формулам (25)...(27), может быть уменьшен в три раза, а 3-й степени безопасности — уменьшен в пять раз.

Размеры зоны, безопасной по действию УВВ на человека, устанавливаются в соответствии с требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах» [17]

$$r_{\min} = 15Q_{\text{Э}}^{1/3}. \quad (28)$$

Массу эквивалентного заряда $Q_{\text{Э}}$ в этом случае определяют в соответствии с приведенными выше указаниями.

Как указано в ЕПБВР [17], формула (28) используется, только если по условиям работ необходимо максимальное приближение персонала, производящего взрывание, к месту взрыва. В остальных случаях расстояния, полученные по формуле (28), следует увеличить в 2...3 раза.

С учетом указанных замечаний формула (28) может быть использована при определении безопасных расстояний до мест расстановки постов оцепления опасной зоны (если радиус опасной зоны по действию УВВ превышает расстояние, безопасное по разлету кусков), а также до мест укрытия взрывников при производстве взрывов.

Критерий плотности потока энергии (удельной энергии) в УВВ может быть также использован при определении безопасных режимов взрывания и расчетах воздействия УВВ взрывов на различные охраняемые объекты и их отдельные конструктивные элементы [18].

Одним из отрицательных факторов, сопутствующих взрывам, является шум, оказывающий неблагоприятное раздражающее действие на человека и животных (в том числе и птиц). Взрывной шум является следствием распространения в воздухе постепенно затухающей ударной воз-

душной волны взрыва. Здесь речь идет об УВВ достаточно малой интенсивности, при которой, как правило, не могут появляться повреждения сооружений (например, застекления зданий). Однако воздействия взрывного шума следует учитывать при производстве взрывных работ в населенных пунктах, рядом с заповедниками, птицефермами и др. объектами [19].

Шум вообще как один из видов звука характеризуется давлением, развиваемым в этом волнообразном процессе. Обычно при количественной оценке определяется уровень звукового давления в нем

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (29)$$

где L — уровень звукового давления, дБ; P — среднеквадратичное за конечное время звуковое давление, Па; $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ — звуковое давление, принятое международными стандартами в качестве порогового, Па.

Допустимый уровень шума в зоне жилой застройки устанавливается в соответствии с указаниями действующих Санитарных норм. Однако приведенные в них нормативы не учитывают особенности взрывного шума.

Шум, вызванный распространением УВВ, качественно отличается от шума, вызванного другими источниками, особенно по временным характеристикам [19]. По основным параметрам (пиковое давление ΔP , время действия положительной фазы τ_+ , общая продолжительность УВВ t) УВВ взрыва можно отнести к так называемым импульсным шумам. К таким шумам относится и звуковой удар от пролета сверхзвукового самолета (СЗС). Звуковой удар от СЗС — это как бы аналог взрывного шума, хотя, конечно, и в этом случае имеется ряд отличий, как по физическим параметрам ударных волн, так и по характеру их воздействия. Для случаев, аналогичных взрывному шуму (звуковой удар от пролета СЗС, УВВ), в качестве критерия опасности вы-

бирается не среднеквадратичный уровень звукового давления, а пиковое избыточное давление на фронте волны.

Уровень взрывного шума при треугольной эпюре давления УВВ можно определить по формуле

$$L = 89 + 20 \lg(\Delta P). \quad (30)$$

Современные СЗС в крейсерском режиме полета возбуждают звуковой удар с пиковым значением избыточного давления не выше 100 Па. Проведенными исследованиями действия таких звуковых ударов на человека и животных установлено, что указанный уровень шума не оказывает заметного влияния на поведение животных и является допустимым по раздражающему действию на человека.

Согласно ГОСТ 2355–79 «Самолеты гражданской авиации», применительно к звуковому удару от СЗС нормируемым параметром является «номинальная максимальная величина избыточного давления на местности». Для крейсерского режима полета она не должна превышать 90 Па, а на участке подъема самолета с разгоном — 110 Па. Критическое его значение при звуковом ударе принимается равным 100 Па.

В силу ряда причин (большая продолжительность положительной фазы τ_+ , широкая полоса территории и большое количество объектов, на которые воздействует звуковой удар и др.) раздражающий эффект звуковых ударов от СЗС оказывается больше, чем от взрывного шума при равных максимальных избыточных давлениях. Поэтому в случае взрывного шума, вызванного УВВ, критическое избыточное давление может превышать 100 Па.

В практике взрывных работ довольно обычными и не встречающимися особых жалоб со стороны населения являются УВВ с $\Delta P=200$ Па. Это значение принято в качестве предельно допустимого пикового избыточного давления при отсутствии в данном районе медицинских и детских учреждений [19]. Если же такие учреждения имеются (что, как правило, имеет ме-

сто в зоне жилой застройки городского типа), то критическое давление должно быть принято равным 100 Па.

В работе [19] приведены формулы для определения радиуса зоны действия взрывного шума для случая взрывания пород II группы (см. табл. 1)

$$r_{ш} = 200Q_{э}^{1/3} \text{ при } Q_{э} \geq 125 \text{ кг}; \quad (31)$$

$$r_{ш} = 100Q_{э}^{1/2} \text{ при } 11 \text{ кг} \leq Q_{э} \leq 125 \text{ кг}; \quad (32)$$

$$r_{ш} = 150Q_{э}^{1/3} \text{ при } Q_{э} < 11 \text{ кг}. \quad (33)$$

При выводе этих формул допустимая величина избыточного давления была принята равной 200 Па, а значения коэффициента метеоусловий принимались с обеспеченностью 95 % против обеспеченности 98 % при прогнозировании воздействия УВВ на застекление (см. табл. 2). При этом вполне справедливо полагалось, что случайные превышения достаточно малого давления во взрывном шуме не грозят столь большими отрицательными последствиями, как при повреждении застекления.

Однако в последнее время, особенно после выхода Закона РФ №52 от 30.03.1999 г. «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», существенно возросли требования в части обеспечения экологической безопасности проводимых работ, в т.ч. и регулярных взрывных работ, осуществляемых на горных предприятиях, расположенных вблизи населенных пунктов.

С учетом этого при определении зоны действия взрывного шума в зоне жилой застройки (т.е. при наличии населенных пунктов в районе проведения взрывных работ) предлагается принять допустимое давление в УВВ равным 90 Па, что соответствует указаниям действующего и в настоящее время ГОСТ 2355–79 в отношении звукового удара от пролетающего СЗС.

Для расчета радиуса зоны действия шума можно использовать формулу (1). Подставив в нее величину допус-

тимого давления $\Delta P=90$ Па и значения коэффициента K_M , принимаемые с обеспеченностью 95 % [19]), получим выражения для определения радиуса зоны действия взрывного шума для случая взрывания пород I и II групп (см. табл. 1)

$$r_{ш} = 450Q_{\text{э}}^{1/3} \text{ при } Q_{\text{э}} \geq 11,0 \text{ кг}; \quad (34)$$

$$r_{ш} = 300Q_{\text{э}}^{1/2} \text{ при } 1,0 \text{ кг} \leq Q_{\text{э}} \leq 11,0 \text{ кг}; \quad (35)$$

$$r_{ш} = 300Q_{\text{э}}^{1/3} \text{ при } Q_{\text{э}} < 1,0 \text{ кг}. \quad (36)$$

Массу эквивалентного заряда в формулах (34)...(36), как и в формулах (31)...(33), определяют с учетом приведенных выше указаний.

Для пород III группы радиус зоны действия шума следует увеличить в 1,5 раза по сравнению с рассчитанным по формулам (31)...(35).

Зимой расчетный радиус действия взрывного шума, рассчитанный по этим формулам, увеличивается еще в 1,5 раза. Следует также учитывать интервал замедления при короткозамедленном взрывании в соответствии с приведенными выше указаниями.

При отсутствии около места проведения взрывов детских и медицинских учреждений, а также животных, находящихся в заповедных местах и на фермах (например, при определении радиуса действия взрывного шума в промышленности), радиус зоны шума может быть уменьшен в 2...3 раза или приниматься в соответствии с рекомендациями [19].

Рекомендации [19] также могут быть использованы при определении радиуса действия взрывного шума в случае проведения непродолжительных взрывных работ на стройплощадках, связанных с обрушением зданий и сооружений, дроблением фундаментов и т.п. работами, а также при проведении однократных крупномасштабных взрывов, например взрывов на выброс и сброс.

Выводы

Проведенные исследования параметров УВВ позволили решить в едином комплексе ряд сложных и актуальных для повышения промышленной безопасности производства взрывных работ задач:

- экспериментально установить степень влияние различных факторов (физико-технические свойства взрывае-мых пород, глубина заложения зарядов, параметры сква-жинных зарядов, толщина слоя воды над зарядом и др.) на массу эквивалентного заряда и параметры УВВ;

- обосновать методику расчета массы эквивалентного заряда и параметров УВВ при взрывах зарядов различного назначения (наружные, скважинные и шпуровые заряды, заряды выброса и сброса, подводные заряды) в зависимости от свойств взрывае-мых пород и строительных материалов, параметров расположения зарядов, интервалов замедлений, конструкции защитных укрытий мест взрывов, метеоусло-вий и др. факторов;

- оценить эффективность использования способов сни-жения интенсивности УВВ при расчетах размеров опасной зоны действия УВВ при взрывах;

- разработать единую методику расчета радиусов опас-ной зоны при взрывах зарядов различного назначения по действию УВВ на земной поверхности;

- повысить надежность прогнозирования промышлен-ной безопасности производства взрывных работ по дейст-вию УВВ на земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротков П.Ф.* Об ударных волнах на значительном расстоянии от места взрыва. — Изв. АН СССР, ОНТ, 1958. — №3. — С. 165—168.

2. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И., Цейтлин Я.И.* Пьезоэлектрический прибор для измерения давления в слабых ударных воздушных волнах взрывов. ФТПРПИ, 1979. — № 1. — С. 133—136.

3. *Ганопольский М.И.* Прогнозирование параметров ударных воздушных волн при взрывах на открытых горных работах. Автореф. диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. — М.: ИПКОН АН СССР. — 1984. — 17 с.

4. *Цейтлин Я.И., Ганопольский М.И., Громов В.А.* Влияние метеоусловий на интенсивность слабый ударно-воздушных волн взрывов. — ФТПРПИ, 1980. — № 3. — С. 51—56.

5. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И.* Анализ факторов, определяющих интенсивность УВВ. — Монтаж. и спец. строительные работы. Серия: Спец. строит. работы. Экспресс-информ., 1985. — Вып. 10. — С. 25—30.

6. *Цейтлин Я.И., Смолий Н.И., Ганопольский М.И.* Влияние забойки скважин на интенсивность ударной воздушной волны. — Горный журнал, 1973. — № 2. — С. 42—44.

7. *Ганопольский М.И., Цейтлин Я.И.* К расчету давления во фронте ударной воздушной волны при массовых взрывах скважинных зарядов. — Горный журнал, 1980. — № 1. — С. 44—46.

8. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И.* Ударные воздушные волны при взрывах шпуровых зарядов. — ЦБНТИ ММСС СССР, Экспресс-информ., серия «Специальные строительные работы», 1983. — Вып. 1. — С. 32—37.

9. *Смолий Н.И., Алешин Л.П., Ганопольский М.И., Дроговейко К.И.* Ударные воздушные волны при взрывах детонирующего шнура. — ФТПРПИ, 1985. — № 2. — С. 48—52.

10. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И., Цейтлин Я.И.* Ударные воздушные волны при взрывах зарядов выброса на строительстве мелиоративных каналов. — Монтаж. и спец. строительные работы. Серия: Спец. строит. работы. Экспресс-информ., 1987. — Вып. 6. — С. 14—18.

11. *Смолий Н.И., Ганопольский М.И.* Расчет безопасных параметров ударных воздушных волн при подводных взрывах. — Гидротехническое строительство, 1985. — № 1. — С. 31—32.
12. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И.* Ударные воздушные волны при короткозамедленном взрывании на открытых горных работах. — ФТПРПИ, 1985. — № 6. — С. 46—51.
13. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И.* Ударные воздушные волны при взрывном дроблении фундаментов. — Монтаж и спец. строительные работы. Серия: Спец. строит. работы. Экспресс-информ., 1988. — Вып. 1. — С. 21—23.
14. *Ганопольский М.И., Смолий Н.И.* Влияние забойки на снижение интенсивности ударных воздушных волн при взрывах наружных зарядов. — Горный журнал, 1978. — №7. — С. 52—54.
15. *Садовский М.А.* Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований. — В сб.: Механическое действие взрыва. — М.: ИДГ РАН, 1994. — С.7—102.
16. *Смолий Н.И., Цейтлин Я.И., Ганопольский М.И.* Радиус разрушения остекления зданий при взрывах малых наружных зарядов. — Горный журнал, 1975. — № 1. — С. 56—59.
17. *Единые правила безопасности при взрывных работах (ПБ 13-407-01)/* Редкол. А.И.Субботин и др. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 30.01.2001 г. — № 3.
18. *Цейтлин Я.И., Гильманов Р.А.* Об энергетическом критерии опасности действия взрывных волн промышленных взрывов. — В кн.: Взрывное дело, №85/42. — М.: Недра, 1983. — С. 61—73.
19. *Цейтлин Я.И., Громов В.А.* Расчет радиуса зоны действия взрывного шума. — Монтаж и спец. строительные работы. Серия Спец. строит. работы. Экспресс-информ., 1984. — Вып. 11. — С. 22—26.