

Изобретение относится к взрывному делу и может быть использовано при дроблении негабарита, разрушении мерзлых грунтов и в других случаях, когда бурение шпуров затруднительно или неэкономично.

Существует зависимость, связывающая пространственное положение фронта сильных ударных воздушных волн (УВВ) с начальными параметрами взрыва

$$R(t) = \frac{\dot{R}_0^2}{|\ddot{R}_0|} \ln\left(1 + \frac{|\dot{R}_0|}{\dot{P}_0} t\right),$$

где  $\dot{R}$  - начальная скорость УВВ;  $\dot{R}_0$  - замедление УВВ в начале движения.

Данная зависимость позволяет определить опасную зону при взрыве наружного заряда, однако для этого нужно иметь трудно определяемые на практике начальную скорость и начальное ускорение УВВ, зависящее от массы и удельной энергии заряда (Федоренко П.И., Оника С.Г., Мантула Ю.М. Условие образования ударной воздушной волны максимальной интенсивности. Разработка рудных месторождений. - Республиканский научно-технический сборник. - Кривой Рог, 1992. - С.53 - 56).

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является способ определения расстояний, безопасна по действию ударной воздушной волны (УВВ) при промышленных взрывах, включающий размещение наружных зарядов на земной поверхности и их инициирование, в котором безопасное расстояние  $R$  определяется из выражений

$$R = k_B \sqrt[3]{Q}, \quad R = K_B \sqrt{Q},$$

где  $R$  - безопасное расстояние, м;  $Q$  - масса заряда ВВ, кг;  $k_B, K_B$  - коэффициенты пропорциональности, величина которых зависит от условий расположения и массы заряда, а также от степени повреждений зданий и сооружений (Единые правила безопасности при взрывных работах. - К.: Норматив, 1992. - С.125 - 129).

Известный способ имеет следующий существенный недостаток. Из практики производства взрывных работ наружными зарядами известно, что решающее влияние на величину опасной зоны при взрыве наружного заряда имеет аномальное состояние атмосферы в момент производства взрывных работ. Поэтому, при количественном анализе деструктивного действия УВВ наиболее существенным элементом должен быть учет изменений состояния атмосферы при производстве взрывных работ.

Известным способом невозможно решать задачу, поставленную изобретением, так как при изменении атмосферных условий - давления, температуры, влажности, что в суммарном эффекте приводит к изменению плотности воздуха, существенно изменяется длина пробега ударных воздушных волн при взрывах наружных зарядов ВВ, тогда как условия расположения зарядов, их масса и степень повреждения окружающих место проведения взрывных работ

зданий и сооружений остаются неизменными. То есть, в известном способе коэффициенты пропорциональности  $k_B = \text{const}$  и  $K_B = \text{const}$  как при нормальных, так и при аномальных атмосферных условиях остаются неизменными при существенном изменении длины пробега ударных воздушных волн, что приводит на практике к некорректному определению безопасных расстояний по действию УВВ при использовании известного способа.

Задачей изобретения является разработка способа определения опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда, который заключается в обеспечении возможности учета аномальных атмосферных условий при движении в приповерхностном слое фронта повышенного давления, что способствует сохранности промышленных и бытовых зданий и сооружений за пределами опасной зоны и гарантирует минимальное воздействие избыточного давления на фронте ударных воздушных волн на окружающую среду.

Поставленная задача решается тем, что в способе определения опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда, включающем размещение наружного заряда на свободной поверхности, его инициирование и определение радиуса опасной зоны, согласно изобретению, перед производством взрывных работ одним из известных методов измеряют температуру и абсолютную влажность нижних слоев атмосферы, определяют относительную влажность воздуха, а радиус  $R$  опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда определяют из выражения

$$R = \frac{4}{\sqrt{k_n}} \sqrt[3]{\frac{Q}{\rho_0}}, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5,$$

где  $Q$  - суммарная масса рассредоточенного наружного заряда, кг;  $\rho_0$  - плотность атмосферы при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $k_n$  - коэффициент относительной плотности воздуха,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ :

$k_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха  $0 < \varphi < 20\%$ ;

$k_2 = 1,7 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха  $20\% < \varphi < 40\%$ ;

$k_3 = 8 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха  $40\% < \varphi < 60\%$ ;

$k_4 = 4 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха  $60\% < \varphi < 80\%$ ;

$k_5 = 0,9 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха  $80\% < \varphi < 100\%$ .

Благодаря тому, что перед производством взрывных работ одним из известных методов измеряют температуру и абсолютную влажность нижних слоев атмосферы, становится возможным определение относительной влажности воздуха на момент производства взрывных работ.

Наличие влаги в единице объема воздуха определяет его плотность в конкретный момент

времени, при этом эта плотность зависит и от наличия или отсутствия избыточного давления в локальной части атмосферы. Так как давление и плотность в движущейся среде связаны прямо пропорциональной зависимостью, учет изменения давления можно производить посредством учета изменения плотности. Если ввести коэффициент относительной плотности воздуха в виде

$$k = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_*} \quad (1)$$

где  $\rho_0$  - плотность атмосферы в отсутствии избыточного давления;  $\rho_*$  - плотность воздуха на фронте УВВ, то зависимость от относительной влажности воздуха  $\varphi$  при исчезающе малом  $k$ , что и имеет место в реальных условиях при трансформации УВВ в звуковую, описывается, согласно адиабате Гюгони убывающей функцией  $k(\varphi)$  (см. чертеж).

На практике нужно иметь оценку опасной зоны, то есть величину, не превышающую некоторой нижней границы, за пределами которой гарантируется полная трансформация УВВ в звуковую. Следовательно, область определения относительной влажности можно разбить на промежутки, в данном случае их достаточно пяти, в пределах которых относительная плотность постоянна и обеспечивает (с некоторым запасом) полную трансформацию ударной воздушной волны в звуковую.

Таким образом, на промежутке **[0%, 100%]** функцию  $k(\varphi)$  полагаем принимающей дискретные значения

$$k = k_n, n = 1, 2, 3, 4, 5,$$

при этом, в целях гарантии трансформации ударной волны в звуковую дискретные значения  $k_n$  отождествляются с минимальным значением непрерывной кривой на соответствующей части промежутка:

$$k_1 = 4 \cdot 10^{-3}, k_2 = 1,7 \cdot 10^{-3}, k_3 = 8 \cdot 10^{-4}, \\ k_4 = 4 \cdot 10^{-4}, k_5 = 0,9 \cdot 10^{-4}.$$

Независимо от геометрии рассредоточения наружного заряда на свободной поверхности и способа его инициирования в связи с исчезающе малым объемом заряда по сравнению с объемом области распространения ударной воздушной волны за пределами относительно небольшой окрестности наружного заряда ударная воздушная волна с достаточной для практики точностью распространяется в виде полусферического слоя уплотненного воздуха толщиной  $R-h$ , где  $R=R(t)$  - фронт ударной воздушной волны,  $h=h(t)$  - некоторая поверхность, разделяющая полосу повышенного давления от области пониженного и релаксирующего давления за фронтом ударной воздушной волны.

Таким образом, при любой форме рассредоточения наружного заряда на свободной поверхности и способе его инициирования, ударная воздушная волна в окрестности наружного заряда распространяется в виде сферического слоя уплотненного воздуха и,

учитывая величину давления продуктов детонации ВВ. можно принять, что в этом слое воздух уплотняется до максимальной плотности  $\rho_*$  насыщенных паров воды в единице объема при максимальном избыточном давлении.

Благодаря тому, что фронт ударной воздушной волны в окрестности наружного заряда движется в виде слоя уплотненного воздуха плотности  $\rho_*$ , учитывая исчезающе малый объем наружного заряда по отношению к области распространения УВВ, из условия сохранения потока вещества получаем

$$\rho_0 R^3 = \rho_* (R-h)(R^2 + Rh + h^2), \quad (2)$$

где  $R$  - положение фронта УВВ в любой момент времени;

$R-h$  - толщина сферического слоя уплотненного воздуха.

Очевидно, что

$$R(0) = h(0),$$

где  $t=0$  - момент детонации наружного заряда ВВ.

Процесс прохождения УВВ в атмосфере при взрыве наружных зарядов очень кратковременен, поэтому, учитывая слабую теплопроводность воздуха, с достаточной для практики точностью можно считать, что давление в области УВВ удовлетворяет уравнению газового состояния при изотермическом процессе

$$pV = \text{const},$$

где  $P$  - давление в области УВВ;  $V$  - объем области УВВ.

Отсюда, поскольку

$$P = \frac{1}{2} \rho_* U^2,$$

где  $U$  - скорость частиц воздуха в области УВВ, получаем

$$\frac{1}{2} \rho_* \int_V U^2 dV = \text{const} \leq 2Q \left( \frac{D}{2} \right)^2, \quad (3)$$

где  $Q$  - суммарная масса рассредоточенного наружного заряда;

$D$  - скорость детонации ВВ, удвоение энергии наружного заряда ВВ в правой части (3) учитывает эффект отражения от свободной поверхности.

Из (2) и (3) получаем замкнутую систему уравнений относительно  $R$  и  $h$

$$\begin{cases} h^3 = k R^3, \\ \pi \rho_* \int_h^R U^2 r^2 dr \leq \frac{Q D^2}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Дифференцируя первое уравнение системы (4), получаем

$$\frac{h^2 \dot{h}}{R^2} = k \dot{R}, \quad (5)$$

где точка обозначает дифференцирование по времени.

Отсюда и из условия непрерывности функции скорости  $U(r,t)$  частиц воздуха в области УВВ, получаем

$$U(r,t) = \frac{h^2(t) \dot{h}(t)}{r^2} \quad (6)$$

Из (1), (4), (5), (6) получаем систему

$$\begin{cases} h^4 \dot{h}^2 \int_h^R \frac{dr}{r^2} \leq \frac{R D^2}{2 \pi \rho_*}, \\ h = \sqrt[3]{k} R, \\ \dot{h} = k \left( \frac{R}{h} \right)^2 \dot{R}, \\ \rho_* = \frac{\rho_0}{1-k}. \end{cases}$$

Интегрируя и заменяя  $\rho_*$  на  $\rho_0$ , получаем

$$\frac{h^4 \dot{h}^2}{R} \left( \frac{R}{h} - 1 \right) \leq \frac{Q D^2 (1-k)}{2 \pi \rho_0},$$

или, исключая  $h$  и  $\dot{h}$ :

$$\sqrt[3]{k^5} \cdot R^3 \dot{R}^2 (1 - \sqrt[3]{k}) \leq \frac{Q D^2 [1 - (\sqrt[3]{k})^3]}{2 \pi \rho_0}$$

то есть

$$\dot{R}^3 \leq \frac{1}{2 \pi} \left( \frac{D}{R} \right)^2 \frac{1 + \sqrt[3]{k} + \sqrt[3]{k^2}}{\sqrt[3]{k^4}} \frac{Q}{\rho_0}.$$

В момент трансформации ударной воздушной волны в звуковую ее скорость  $R$  переходит в скорость звука в воздухе  $C$ , отсюда получаем

$$R \leq \sqrt[3]{\frac{1}{2 \pi} \left( \frac{D}{C} \right)^2 (1 + \sqrt[3]{k} + \sqrt[3]{k^2})} \times \sqrt[3]{\frac{Q}{\rho_0}} \quad (7)$$

где  $R$  - длина пробега ударной воздушной волны при взрыве рассредоточенного заряда ВВ с учетом аномальных атмосферных условий.

При переходе к равенству в нестрогом неравенстве (7), необходимо брать верхний предел изменения параметров, стоящих в числителе, и нижний предел параметров, стоящих в знаменателе при известной области их изменения.

При средней скорости детонации современных промышленных ВВ и скорости звука  $C$  в воздухе при нормальных атмосферных условиях

$$3 < \sqrt[3]{\frac{1}{2 \pi} \left( \frac{D}{C} \right)^2 (1 + \sqrt[3]{k} + \sqrt[3]{k^2})} < 4.$$

Следовательно, полагаем

$$\sqrt[3]{\frac{1}{2 \pi} \left( \frac{D}{C} \right)^2 (1 + \sqrt[3]{k} + \sqrt[3]{k^2})} = 4.$$

Коэффициент  $k^{5/9}$  находится в знаменателе правой части (7). Имеем очевидное неравенство

$$k^{5/9} > k^{5/10} = \sqrt{k},$$

$$\frac{5}{9} - \frac{5}{10} \approx 0,055,$$

а поскольку следовательно

$$k^{5/9} \approx k^{5/10} = \sqrt{k}.$$

и, в соответствии с вышесказанным, можно положить

$$k^{5/9} \approx \sqrt{k}.$$

Минимум  $\rho_0$  представляет собой плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, следовательно, при переходе к равенству, получаем

$$R = \frac{4}{\sqrt{k}} \sqrt[3]{\frac{Q}{\rho_0}}.$$

Разделив, согласно (см. чертеж), промежуток изменения  $k$  на пять равных частей, получаем (при минимуме  $k_n$ ) удобное для практики выражение радиуса действия УВВ при взрыве рассредоточенного наружного заряда

$$R = \frac{4}{\sqrt{k}} \sqrt[3]{\frac{Q}{\rho_0}}, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5,$$

где  $R$  - радиус опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда, м;  $Q$  - суммарная масса рассредоточенного наружного заряда, кг;  $\rho_0$  - плотность атмосферы при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $k_n$  - коэффициент относительной плотности воздуха,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ :

$k_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха 0-20%;

$k_2 = 1,7 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха 20-40%;

$k_3 = 8 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 40-60%;

$k_4 = 4 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 60-80%;

$k_5 = 0,9 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 80-100%.

Таким образом, благодаря совокупности перечисленных выше известных и новых существенных признаков стало возможным осуществление причинно-следственных связей между аномальными атмосферными условиями на момент проведения взрывных работ наружными зарядами и давлением на фронте ударной воздушной волны при детонации рассредоточенного наружного заряда, что обеспечивает надежное определение максимально возможной опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда, за пределами которой гарантируется сохранность промышленных и бытовых зданий и сооружений и минимальное действие избыточного давления фронта ударной воздушной волны на окружающую среду.

Сущность способа определения опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда поясняется чертежом (фиг.), на котором изображен график зависимости относительной плотности воздуха от относительной влажности.

Предлагаемый способ осуществляется следующим образом. Перед производством взрывных работ наружными зарядами одним из известных методов, например, термометром и гигрометром, измеряют, соответственно, температуру и влажность (количество водяного пара, фактически содержащееся в  $1\text{ м}^3$  воздуха) нижних слоев атмосферы.

Затем, используя значение плотности насыщенных паров воды для полученной температуры, определяют относительную влажность воздуха как отношение абсолютной (измеренной) влажности и максимально возможной (табличной) при соответствующей температуре, по определению относительной влажности в процентах определяют коэффициент относительной плотности на фронте ударной воздушной волны  $k_n$ , соответствующей полученной относительной влажности.

После этого радиус опасной зоны при взрыве рассредоточенного наружного заряда определяют из выражения

$$R = \frac{4}{\sqrt{k}} \sqrt[3]{\frac{Q}{\rho}}, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5.$$

где  $R$  - радиус опасной зоны, м;  $Q$  - суммарная масса рассредоточенного заряда, кг;  $\rho_0$  - плотность атмосферы при нормальных условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_n$  - относительная плотность воздуха,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ :

$k_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха 0-20%;

$k_2 = 1,7 \cdot 10^{-3}$  при относительной влажности воздуха 20-40%;

$k_3 = 8 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 40-60%;

$k_4 = 4 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 60-80%;

$k_5 = 0,9 \cdot 10^{-4}$  при относительной влажности воздуха 80-100%.

Пример. Производится дробление негабарита при открытых работах, масса наружного заряда для требуемого дробления не менее 10 кг. Требуется определить, на какое минимальное расстояние необходимо удалить людей и технику при производстве взрывных работ наружными зарядами, если измеренная температура и абсолютная влажность воздуха дала соответствующие результаты -  $16^\circ\text{C}$  и  $10\text{ г/м}^3$ .

Из таблиц максимальной влажности, максимальная плотность насыщенных паров воды при температуре  $16^\circ\text{C}$  равна  $13,65\text{ г/м}^3$ , следовательно, в данном случае относительная влажность воздуха равна

$$\frac{10\text{ г/м}^3}{13,65\text{ г/м}^3} \times 100\% \approx 73\%.$$

Так как  $60\% < 73\% < 80\%$ , в данном случае, согласно формулы изобретения  $n = 4$ ,

$$k_4 = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Плотность воздуха при нормальных

атмосферных условиях равна

$$\rho_0 = 1,25\text{ кг/м}^3.$$

следовательно, имеются все данные

$$Q = 10\text{ кг}, \quad \rho_0 = 1,25\text{ кг/м}^3, \quad k_4 = 4 \cdot 10^{-4}$$

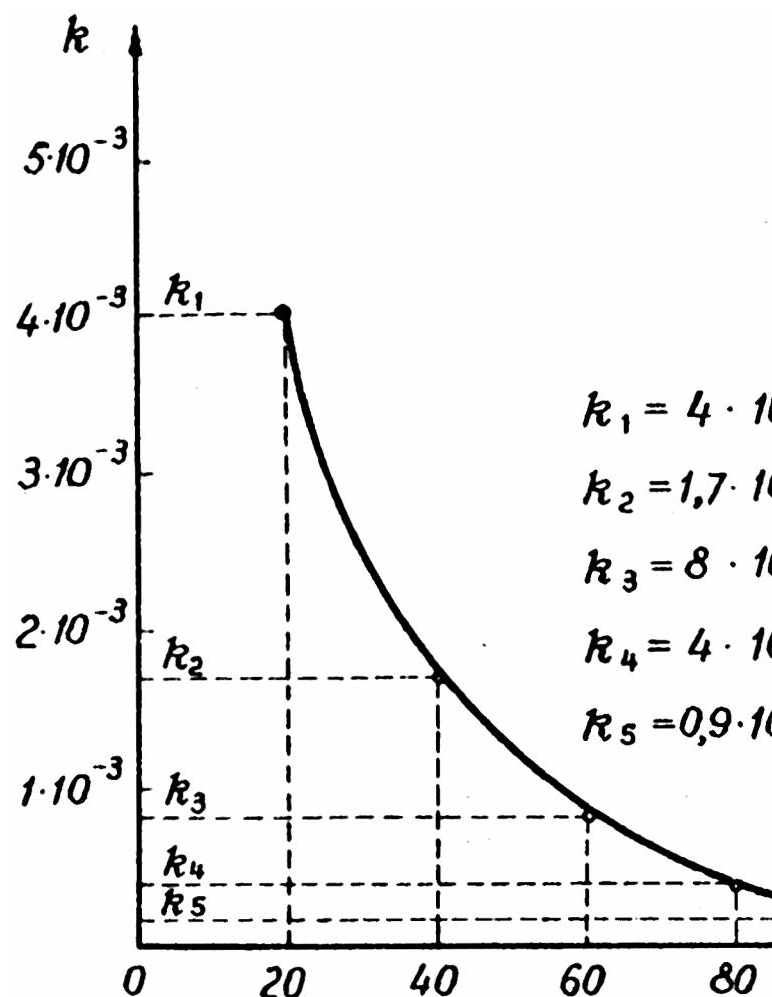
для расчета опасного расстояния:

$$R = \frac{4}{\sqrt{4 \cdot 10^{-4}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{10}{1,25}}\text{ м} =$$

$$= \frac{4 \times 100}{2 \times 5} \sqrt[3]{1000}\text{ м} = 400\text{ м}.$$

То есть, в данном случае в зоне радиусом 400 м от взрыва наружного заряда ударная воздушная волна полностью трансформируется в звуковую, что гарантирует сохранность техники и безопасность людей за пределами четырехсотметровой опасной зоны.

Применение предлагаемого изобретения позволяет обеспечить сохранность промышленных и бытовых зданий и сооружений за пределами опасной зоны и гарантирует минимальное воздействие избыточного давления фронта ударных воздушных волн на окружающую среду за счет обеспечения возможности учета аномальных атмосферных условий при движении в приповерхностном слое фронта повышенного давления.



Фиг.