

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДАРНЫХ ВОЛН ВЗРЫВА ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПО СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Асс. Головнёва Е.Е. ДонНТУ, Донецк

Наибольшую опасность в угольных шахтах представляют аварии, вызванные взрывом метана и угольной пыли, которые составляют 18,9% от общего количества, а несчастные случаи со смертельным исходом при этих авариях - 86%. При взрывах шансы на выживание в 112 раз меньше, чем при других авариях. Особо опасны для жизни людей взрывы, возникающие во время горноспасательных работ, так как существует угроза формирования объёмов газа с взрывоопасной концентрацией метана из-за нарушения системы вентиляции[1].

В связи с этим, исследования направленные на изучение возникновения ударных воздушных волн и защита от их поражающего действия людей, подземных коммуникаций и сооружений имеет важное значение. Так как большая разрушительная сила УВВ сопряжена с необходимостью выполнения работ по демонтажу и укрытию оборудования, силовых магистралей, крепи горных выработок и т. п. Действием УВВ в первую очередь нарушаются вентиляционные сооружения и регулирующие устройства, что приводит к увеличению продолжительности проветривания выработок и простоя в работе. Поэтому важное практическое значение приобретают изучение параметров УВВ, расчёт опасных зон их действия, гашение УВВ, возникающих в горных выработках при взрывах зарядов ВВ, метана и угольной пыли. Разработка мероприятий по повышению устойчивости подземных объектов при воздействии поражающих факторов взрыва и воздействия УВВ.

Основными величинами, характеризующими УВВ, являются избыточное давление ΔP на фронте, время действия фазы сжатия $\tau_{сж}$, скорость фронта u , температура на фронте T и эффективное время действия $\tau_{эф}$. А также УВВ характеризуются импульсом I в сжатой и разреженной фазах и плотностью потока ρ на фронте.

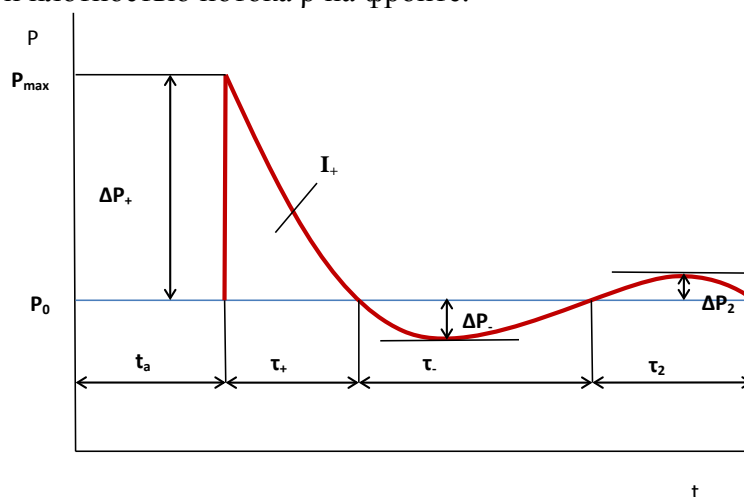


Рис. 1 - Профиль ударной волны

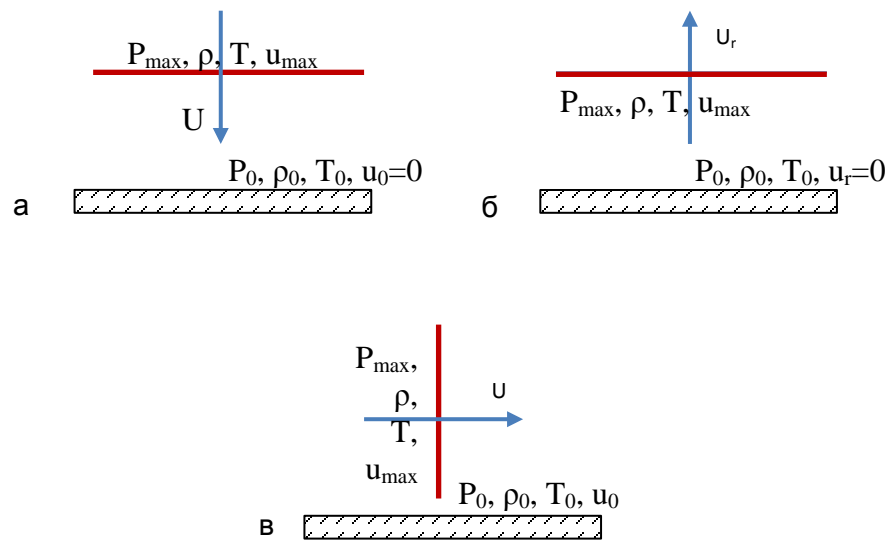


Рис. 2 - Распространение ударной волны и её параметры: а) по нормали к поверхности, б) отражаясь от поверхности, в) вдоль поверхности

Опасность УВВ при взрыве метана, угольной пыли определяется двумя основными параметрами – избыточным давлением ΔP_+ во фронте УВ и временем действия избыточного давления $\tau_{сж}$ (фаза сжатия). Избыточное давление ΔP_+ как в зоне горения, так и после прекращения горения зависит от состава исходной смеси, длины загазированной части выработки, размеров выработки, её загроможденности, типа крепи и других факторов. Время действия избыточного давления $\tau_{сж}$ также зависит от перечисленных выше факторов и от того, в какой выработке произошёл взрыв: в открытой или в изолированной глухой преградой.

При рассмотрении МВС и ПВС как частные случаи ТВС (МВС – газообразная, ПВС – гетерогенная), для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при их взрывах можно применить Методику оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409-01 Введена в действие постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.01 N 25)[2]. Этапы расчёта представлены на рис. 3 в виде блок – схемы.

Используемые обозначения

C_0 - скорость звука в воздухе, м/с;

C_r - концентрация горючего вещества в облаке ТВС, кг/м³ ;

$C_{ст}$ - стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м³;

E - эффективный энергозапас ТВС, Дж;

I - импульс волны давления, Па · с;

I_+ - импульс фазы сжатия, Па · с;

I_- - импульс фазы разрежения, Па · с;

I_{r+} - импульс отражённой волны давления, Па · с;

I_{r-} - импульс отражённой волны разрежения, Па · с;

I_x - безразмерный импульс фазы сжатия;

K_i - декремент затухания;

K_r - декремент изменения давления в отражённой волне;

M_r - масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг;

ΔP - избыточное давление, Па;

ΔP_+ - амплитуда волны давления, Па;

ΔP_- - амплитуда волны разрежения, Па;

ΔP_+ - амплитуда отражённой волны давления, Па;

ΔP_r - амплитуда отражённой волны разрежения, Па;
 P_0 - атмосферное давление, Па;
 P_x - безразмерное давление;
 Pr_1 - пробит-функция повреждений стен промышленных зданий;
 Pr_2 - пробит-функция разрушения промышленных зданий;
 Pr_3 - пробит-функция длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна);
 Pr_4 - пробит-функция разрыва барабанных перепонки у людей;
 Pr_5 - пробит-функция отброса людей волной давления;
 R - расстояние от центра облака ТВС, м;
 R_x - безразмерное расстояние от центра облака ТВС;
 V_f - скорость видимого фронта пламени, м/с;
 W - тротильный эквивалент взрыва ТВС, кг;
 m - средняя масса человека, кг;
 q_r - удельная теплота сгорания газа, Дж/кг;
 t - время процесса, с;
 β - корректировочный параметр, характеризующий фугасные свойства ТВС;
 λ - параметрическое расстояние;
 σ - степень расширения продуктов сгорания;
 t_+ - длительность фазы сжатия, с;
 t_- - длительность фазы разрежения, с;
 t_{r+} - длительность отражённой волны давления, с;
 t_{r-} - длительность отражённой волны разрежения, с.

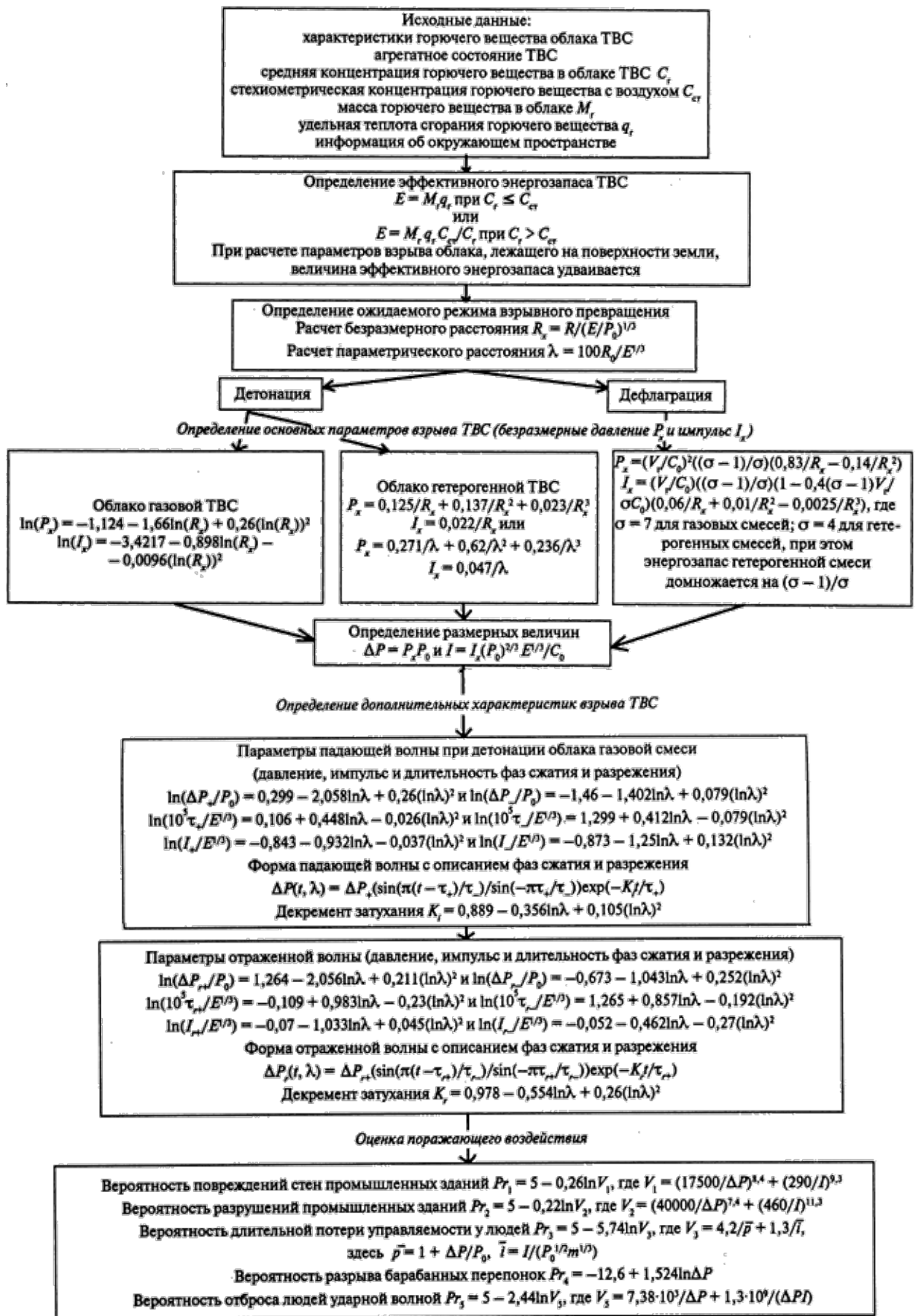


Рис. 3 - Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей

Вышеприведённая методика удобна для определения параметров УВВ, т. к. основана на аналитических соотношениях, допускающих ручной счёт. Однако нуждается в доработке при её применении в подземных условиях шахты. Основными выходными параметрами расчёта являются давление и импульс во фронте ударной волны, распространяющейся только по одному маршруту на прямолинейном участке, который необходимо выбирать на схеме горных выработок. Методика не учитывает местные сопротивления при поворотах и пересечениях горных выработок, отражение ударных волн от твёрдых поверхностей в местах поворота, взаимодействие ударных волн и формирование волн разрежения, взаимодействие со стенками выработок.

Усовершенствование методики состоит в компьютеризированном решении системы уравнений математической модели газодинамического метода. Математическая модель основана на доработке газодинамического метода до возможности расчёта распространения ударных волн по разветвлённой сети горных выработок реальной шахты[3].

Для расчёта течения продуктов взрыва и распространения ударных волн в прямолинейных выработках используются одномерные уравнения газовой динамики, где в правых частях учитываются процессы силового и теплового взаимодействия потока со стенками:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho_f S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} &= -\tau_{mp} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} &= q \Pi \\ E &= c_v T + \frac{u^2}{2}; \quad p = \rho R T, \end{aligned}$$

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}, \quad Re = \frac{\rho u D_{экв}}{\mu}, \quad D_{экв} = \frac{4S}{\Pi},$$

$$q = \alpha (T_s - T), \quad Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,47} B, \quad Pr = \frac{\rho c}{\lambda_g}, \quad Nu = \frac{\alpha D_{экв}}{\lambda_g},$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{opt}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{opt}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \end{cases} \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13,$$

- где t – время;
x – координата;
ρ – плотность;
p – давление;
ρ_f – плотность продуктов взрыва;
T – температура;
R – газовая постоянная;
u – скорость;
E – полная энергия;
S – площадь поперечного сечения канала;

Π - периметр канала;
 $\tau_{\text{тр}}$ - сила трения о стенки канала;
 q - тепловой поток в стенки канала; - коэффициент сопротивления;
 Re - число Рейнольдса;
 $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка канала;
 μ - коэффициент динамической вязкости;
 Nu - число Нуссельта;
 Pr - число Прандтля;
 T_S – температура стенки;
 λ_g - коэффициент теплопроводности;
 α - коэффициент теплообмена;
 c – теплоёмкость;
 B - поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена;
 l - характерное расстояние между выступами шероховатости;
 δ - характерная величина выступа.

Компьютеризированное решение системы уравнений математической модели газодинамического метода предполагается с помощью оригинальной авторской программы или (что предпочтительнее) с применением существующих пакетов программ для математического моделирования, которые автоматизирует расчёт распространения поражающих факторов взрыва, исключают пренебрежения в расчётах и «человеческий фактор» появления вычислительных ошибок.

Для проверки адекватности математического моделирования при определении параметров ударной волны на базе буровзрывной лаборатории кафедры СЗПСиГ ДонНТУ проводятся лабораторные испытания разнообразных по составу ВВ и газообразных взрывчатых смесей.

Идея эксперимента состоит в следующем. При взрыве ВВ или взрывчатой смеси фиксируется время прохождения ударной волны специальными датчиками соединёнными с прибором измерения интервалов времени. Также измеряются расстояния от заряда до датчиков и между датчиками. Фиксируется температура и атмосферное давление во взрывной камере. Схема лабораторного эксперимента и конструкция датчика представлены на рисунке 4.

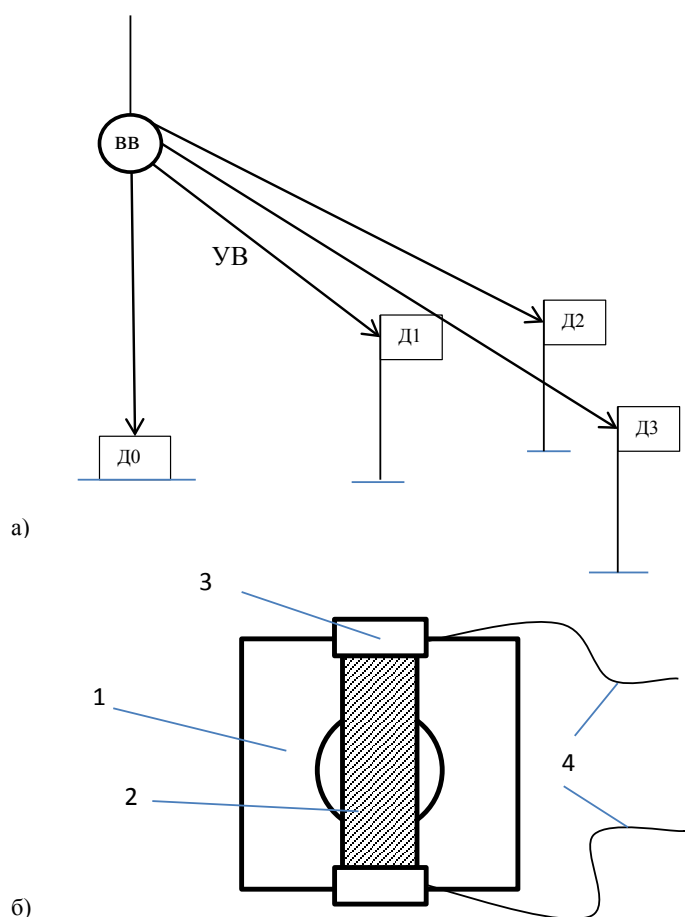


Рис. 4 - а) Схема эксперимента. Д0 – датчик расположенный на полу камеры, Д1, Д2, Д3 – датчики расположенные в воздухе, ВВ, УВ – распространение ударной волны; б) конструкция датчика: 1 – прослойка из ватмана с отверстием, 2 – полосы фольги, 3 – заизолированные зажимы для фольги и проводов, 4 – провода соединяющие датчик с измерителем интервалов времени.

Расчёт скорости ударной волны и избыточного давления в контрольных точках производится по формулам:

$$u = \frac{r}{\tau}$$

$$P = \frac{2 \cdot \rho \cdot u^2}{\gamma + 1} \cdot \left(1 - \frac{c_0^2}{u^2}\right)$$

- где u – скорость ударной волны, м/с;
 r – расстояние до датчика, м;
 τ – время прохождения ударной волны до датчика, с;
 P – избыточное давление, Па;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 γ – адиабата воздуха;
 c_0 – скорость звука, м/с.

Проведённые лабораторные испытания станут основой для обоснования и формулирования закона затухания ударных волн и позволят вывести зависимость энергетических параметров ПГВ смесей от тротилового эквивалента.

Выводы.

1. Анализ исследования параметров ударных волн взрыва при их распространении по сети горных выработок на основании обзора состояния математического моделирования взрывов смесей показал, что современные методы расчёта взрывобезопасных расстояний и взрывозащитных сооружений в угольных шахтах должны быть реализованы с помощью компьютерного программирования.

2. Пути усовершенствования методов расчёта взрывобезопасных расстояний и взрывозащитных сооружений в угольных шахтах и математического моделирования взрывов смесей лежат в области изучения влияния общей энергии взрыва на его параметры и последующие разрушения. Определении тротилового эквивалента газообразных взрывчатых смесей по сравнению с конденсированными ВВ.

Библиографический список

1. Лукашов О. Ю. Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвлённой сети горных выработок.: Автореф. дис. канд. физ.- матем. наук. – Томск: ТГУ, 2002. — 22 с.

2. Методика определения параметров воздушных ударных волн при взрывах газов и пыли в горных выработках. СНиП 2.01.34-84 <http://www.gornospass.ru/>

3. Астанин А. В. Численное исследование многомерных задач распространения волн взрыва в горных выработках угольных шахт.: Автореф. дис. канд. физ.- матем. наук. – Томск: ТГУ, 2005. — 22 с.