

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

**УТВЕРЖДАЮ**  
Зав. каф. РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.И. Туев  
« » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**Теория горения и взрыва**

Методические указания по практическим занятиям и самостоятельной работе

Разработчик: Профессор кафедры  
РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ И.Е. Хорев  
« » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**2012**

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	<b>стр.</b>
<b>1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ</b>	<b>2</b>
<b>2. ОЦЕНКА ФУГАСНОСТИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА</b>	<b>2</b>
<i>2.1. Расчетные методы оценки фугасности взрывчатого вещества</i>	<i>3</i>
<i>2.2. Экспериментальные методы оценки фугасности взрывчатого вещества</i>	<i>4</i>
<i>2.2.1. Метод свинцовой бомбы</i>	<i>4</i>
<i>2.2.2. Метод эквивалентных зарядов</i>	<i>5</i>
<i>2.2.3. Метод баллистического маятника</i>	<i>7</i>
<i>2.2.4. Метод баллистической мортиры</i>	<i>8</i>
<i>2.2.5. Оценка фугасности взрывчатых веществ по измеренным параметрам ударных волн</i>	<i>10</i>
<i>2.2.6. Оценка работоспособности взрывчатых веществ по воронке выброса</i>	<i>11</i>
<b>3. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА</b>	<b>15</b>
<b>Список используемой литературы</b>	<b>16</b>

## **1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Основными факторами воздействия продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ на окружающую среду являются их бризантное и фугасное действие.

Бризантность взрывчатого вещества – это его способность к местному разрушительному действию, при котором нагружение среды осуществляется именно продуктами детонации.

Фугасность – это общее действие взрыва на некотором расстоянии от поверхности заряда взрывчатого вещества. Фугасное действие проявляется в совершении работы разрушения или перемещения среды продуктами взрыва в процессе их расширения. В качестве примера можно привести работу, затраченную на разрушение горных пород или выброс грунта. Наряду с термином фугасность используют термин «работоспособность взрывчатого вещества» – полная удельная (на один килограмм взрывчатого вещества) работа взрыва.

## **2. ОЦЕНКА ФУГАСНОСТИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА**

Ввиду очевидной важности величины фугасности, необходимо проводить ее оценки для каждого конкретного взрывчатого вещества и

условия его применения. Такие оценки можно проводить как теоретически, так и экспериментально.

### 2.1. Расчетные методы оценки фугасности взрывчатого вещества

Теоретической характеристикой работоспособности взрывчатого вещества служит потенциальная энергия  $A_{max}$  – наибольшая работа, которую могут совершить газообразные продукты взрыва при их бесконечном адиабатическом расширении:

$$A_{max} = Q_v = \frac{f}{k-1},$$

где  $Q_v$  – теплота взрыва, Дж/кг;

$k = c_p / c_v$  – показатель адиабаты продуктов взрыва;

$c_p, c_v$  – удельные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме, соответственно, Дж/(кг·К);

$f$  – сила взрывчатого вещества, Дж/кг.

Величина  $f$ , которая может некоторым образом характеризовать работоспособность взрывчатого вещества (без учета степени расширения), рассчитывается по формуле

$$f = RT_1,$$

где  $R = c_p - c_v$  – газовая постоянная продуктов взрыва;

$T_1$  – температура взрыва, К.

При адиабатическом расширении газа (без теплотерь на нагрев окружающей среды), работа взрыва  $A_v$  совершается за счет внутренней энергии  $E = c_v T$ . Если принять, что  $T_1$  – начальная температура (температура взрыва), а  $T_2$  – конечная температура газообразных продуктов взрыва, то для идеального газа работа адиабатического расширения равна:

$$A_v = C_v (T_1 - T_2) = \frac{f}{k-1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \eta A_{max}, \quad (1.1)$$

где  $\eta = \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$  – термодинамический коэффициент полезного действия

взрыва.

В предельном случае (при  $T_2 \rightarrow 0$ ) коэффициент полезного действия  $\eta = 1$  и, соответственно,  $A_v = A_{max}$ .

Формулу (1.1) можно использовать для грубых оценок, поскольку точные данные по величине  $T_2$  получить трудно. На практике, при совершении работы в виде общего действия взрыва (разрушение значительного объема горных пород, выброс грунта) используются приближенные формулы Чельцова:

$$A_g = Q_g \left( 1 - \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1},$$

$$A_g = Q_g \left( 1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

где  $V_1, V_2$  – начальный и конечный объем газообразных продуктов взрыва;

$p_1$  – начальное давление продуктов взрыва;

$p_2$  – давление продуктов взрыва, которое они приобретают после расширения и совершения работы  $A_g$ .

Для взрывчатых веществ, продукты взрыва которых будут иметь приблизительно одинаковый состав, величина  $A_g$  пропорциональна произведению  $\eta Q_g$ . Поэтому работоспособность того или иного взрывчатого вещества может оцениваться по его теплоте взрыва  $Q_g$ . При расчете  $A_g$  по формулам Чельцова предполагается, что величина  $k = const = 1.25$ . Например, для аммонита БЖВ расчет по формулам Чельцова дает значение  $A_g = 4,23$  МДж/кг. Для взрывчатых веществ более сложных составов, величина  $k$  не является константой, а зависит от температуры и давления по сложному закону. Поэтому точно рассчитать работоспособность взрывчатого вещества невозможно и для ее определения используются экспериментальные методы.

## **2.2. Экспериментальные методы оценки фугасности взрывчатого вещества**

Для экспериментальной оценки фугасности (работоспособности) взрывчатого вещества на практике используют следующие методы:

- Метод свинцовой бомбы.
- Метод баллистического маятника.
- Метод баллистической мортиры.
- Определение объема воронки выброса грунта.
- Измерение параметров воздушных ударных волн.

### **2.2.1. Метод свинцовой бомбы**

Метод свинцовой бомбы наиболее широко применяется для определения относительной работоспособности взрывчатого вещества. Бомба изготавливается по Международному стандарту.

Стандартная бомба (бомба Трауцля) соответствует ГОСТ 4546-81 и представляет собой массивный свинцовый цилиндр с несквозным осевым каналом (рис. 1.1).

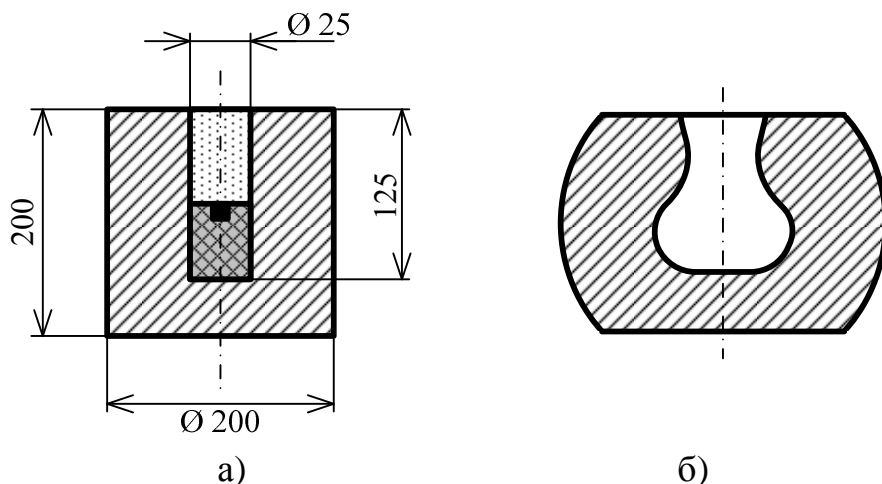


Рис. 1.1. Схема свинцовой бомбы: а – до испытания; б – после испытания

Бомба отливается из рафинированного свинца при  $T = (390 \div 400)^\circ\text{C}$ . На дно канала помещается заряд исследуемого взрывчатого вещества массой 10 г в бумажной гильзе. Свободная часть канала засыпается сухим кварцевым песком (рис. 1.1. а). Заряд взрывчатого вещества инициируется электродетонатором. После взрыва в бомбе образуется характерное вздутие (рис. 1.1. б).

Расширение бомбы  $\Delta V$  ( $\text{см}^3$ ), за вычетом начального объема канала и расширения, производимого детонатором ( $30 \text{ см}^3$ ), является мерой относительной работоспособности взрывчатого вещества.

Испытания проводят в стандартных условиях ( $T = +10^\circ\text{C}$ ), используя одинаковый песок и детонатор. При градуировке бомбы в качестве эталонного взрывчатого вещества может служить дважды перекристаллизованный из спирта тротил.

### 2.2.2. Метод эквивалентных зарядов

Для относительной оценки работоспособности взрывчатых веществ А.Ф. Беляев предложил метод эквивалентных зарядов. Суть метода заключается в определении эквивалентной массы эталонного заряда (например, тротила или аммонита БЖВ), производящего такое же расширение, как исследуемый заряд. Одинаковым расширениям  $\Delta V$  должна соответствовать одинаковая работа взрыва  $A_{\text{в}}$ .

При использовании метода эквивалентных зарядов измерения проводятся в следующем порядке.

- Строится график зависимости расширения свинцовой бомбы  $\Delta V$  от массы взорванного заряда эталонного взрывчатого вещества  $M_{\text{Э}}$ , например, аммонита БЖВ (рис. 1.2).
- Проводится взрыв исследуемого образца взрывчатого вещества массой  $M = 10\text{г}$  и определяется величина  $\Delta V$ .
- По графику (рис. 1.2) находится эквивалентная масса эталонного взрывчатого вещества  $M_{\text{Э}}$ .

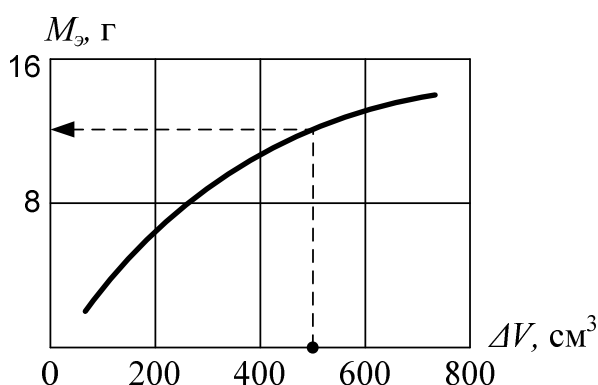


Рис. 1.2. Зависимость расширения свинцовой бомбы от массы взорванного заряда эталонного взрывчатого вещества

- Определяется относительная фугасность (работоспособность) взрывчатого вещества по отношению к эталону

$$\bar{A}_g = \frac{A_g}{A_{g\text{Э}}} = \frac{M_{\text{Э}}}{M}.$$

В соответствии с этой формулой, при  $M = M_{\text{Э}}$ , величина  $\bar{A}_g = 1$ ; при  $M < M_{\text{Э}}$ , величина  $\bar{A}_g > 1$ ; при  $M > M_{\text{Э}}$ , величина  $\bar{A}_g < 1$ .

- Для известного значения работоспособности эталонного вещества  $A_{g\text{Э}}$  можно определить величину  $A_g$  для исследуемого взрывчатого вещества

$$A_g = \bar{A}_g \cdot A_{g\text{Э}}.$$

### 2.2.3. Метод баллистического маятника

Основой маятника является груз, подвешенный на жестких тросах к неподвижной опоре. При воздействии на маятник продуктов взрыва или ударной волны, он получает некоторый импульс силы и отклоняется на соответствующий угол  $\phi$  (рис. 1.3).

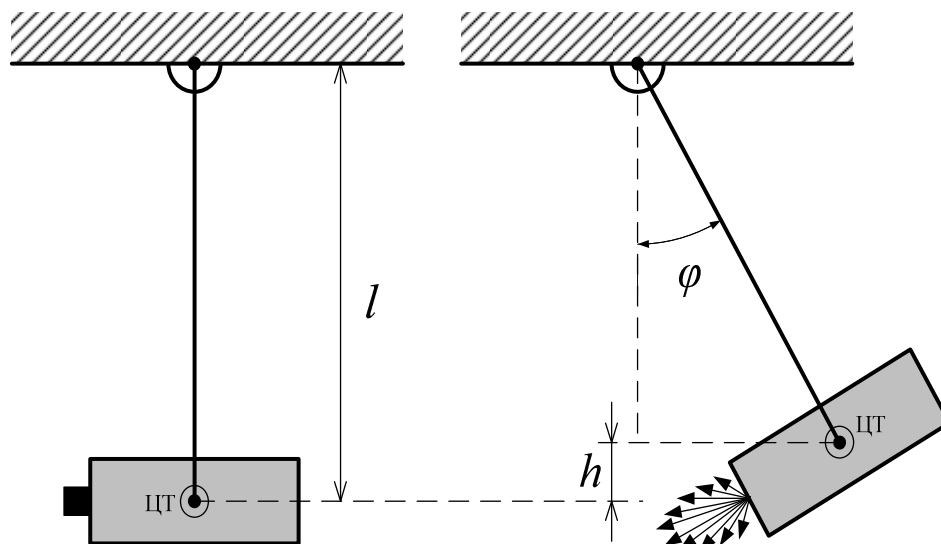


Рис. 1.3. Схема баллистического маятника

При подрыве заряда исследуемого взрывчатого вещества, размещенного на торце маятника, центр тяжести маятника поднимается на высоту  $h$  (рис. 1.3). Таким образом, работа взрыва  $A_в$  затрачивается на подъем центра тяжести маятника и может быть рассчитана по формуле

$$A_в = mgh = mgl(1 - \cos \varphi), \quad (1.2)$$

где  $m$  – масса маятника;  
 $l$  – длина подвеса маятника;  
 $h$  – высота подъема центра тяжести маятника;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

По известным значениям  $m$ ,  $l$  и измеренному углу отклонения  $\varphi$  с помощью формулы (1.2) можно рассчитать величину  $A_в$ .

При испытаниях обычно определяют массу заряда исследуемого взрывчатого вещества, который дает отклонение маятника, равное отклонению при взрыве стандартного взрывчатого вещества массой 200 г. Обычно в качестве эталонного вещества используется тротил. При этом определяется тротильный эквивалент исследуемого взрывчатого вещества. Достоинство метода заключается в возможности проводить испытания крупных зарядов массой более 200 г.

#### 2.2.4. Метод баллистической мортиры

Схема баллистической мортиры приведена на рис. 1.4. Установка для измерения работоспособности взрывчатых веществ состоит из массивной стальной мортиры 1, подвешенной на подвесах 5 в виде маятника, взрывной камеры и расширительной камеры. Во взрывной камере помещается заряд

исследуемого взрывчатого вещества 3 массой 10г; в расширительной камере – массивный поршень-снаряд. При подрыве заряда взрывчатого вещества поршень-снаряд массой  $m$  выбрасывается с начальной скоростью  $u$ , а мортира массой  $M$  отклоняется на угол  $\varphi$ , регистрируемый измерителем 4.

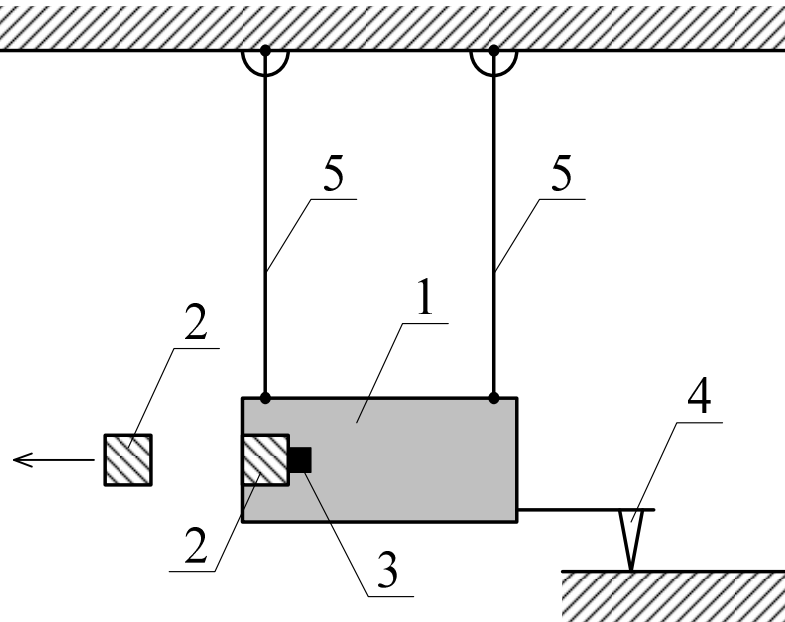


Рис. 1.4. Схема баллистической мортиры: 1-мортира, 2-снаряд, 3-заряд взрывчатого вещества, 4-измеритель отклонения, 5-подвес

Работа  $A_1$ , затраченная на отклонение мортиры на угол  $\varphi$ , рассчитывается по формуле, аналогичной (7.2):

$$A_1 = Mgh = Mgl(1 - \cos \varphi), \quad (1.3)$$

где  $M$  – масса мортиры;

$h = l(1 - \cos \varphi)$  – высота поднятия центра тяжести мортиры;

$l$  – длина подвесов мортиры.

Начальную скорость движения мортиры  $U$  можно определить, приравняв работу отклонения мортиры  $A_1$  и ее кинетическую энергию:

$$\frac{mU^2}{2} = A_1 = mgl(1 - \cos \varphi). \quad (1.4)$$

Из (1.4) следует, что

$$U = \sqrt{2gl(1 - \cos \varphi)}. \quad (1.5)$$



Работа  $A_2$ , затраченная на выброс поршня массой  $m$ , рассчитывается по формуле:

$$A_2 = \frac{mu^2}{2}, \quad (1.6)$$

где  $m$  – масса поршня;  
 $u$  – начальная скорость поршня.

В соответствии с третьим законом Ньютона, количество движения (импульс), полученное mortarой и поршнем должно быть одинаковым:

$$mu = MU. \quad (1.7)$$

Из (1.5) и (1.7) можно получить формулу для расчета скорости снаряда:

$$U = \frac{M}{m}u = \frac{M}{m}\sqrt{2gl(1 - \cos\varphi)}. \quad (1.8)$$

Подставляя (1.8) в (1.6), получим формулу для расчета работы, затраченной на выброс поршня

$$A_2 = \frac{M^2}{m}gl(1 - \cos\varphi). \quad (1.9)$$

Полная работа взрыва будет равна сумме работ, затраченных на выброс поршня и отклонение mortarы:

$$A_e = A_1 + A_2 = Mgl(1 - \cos\varphi)\left(1 + \frac{M}{m}\right). \quad (1.10)$$

Таким образом, по известным значениям  $M$ ,  $m$ ,  $l$  и измеренному углу отклонения mortarы  $j$  с помощью формулы (1.10) можно рассчитать работоспособность исследуемого взрывчатого вещества.

### 2.2.5. Оценка работоспособности взрывчатых веществ по воронке выброса

При взрыве сосредоточенного заряда взрывчатого вещества, расположенного в грунте на некоторой глубине, образуется воронка конической формы радиусом  $R$  и глубиной  $h$  (рис. 1.5). Как показали результаты многочисленных экспериментов, объем образовавшейся воронки  $V$  пропорционален работоспособности заряда взрывчатого вещества:

$$A_g : V = \frac{1}{3} R^2 h.$$

На этом принципе основан метод оценки относительной работоспособности взрывчатого вещества. В песчаном грунте на фиксированной для данной серии опытов глубине, зависящей от потенциальной энергии взрыва, подрывают заряды исследуемого и эталонного взрывчатых веществ. При этом заряд исследуемого взрывчатого вещества имеет фиксированную массу  $M$ , а масса эталонного заряда  $M_{\text{Э}}$  варьируется до тех пор, пока объем воронки, образуемой при взрыве эталонного и исследуемого зарядов, не будет одинаковым. Относительная работоспособность определяется по формуле:

$$\bar{A}_g = \frac{M_{\text{Э}}}{M},$$

где  $M_{\text{Э}}$  – масса эквивалентного заряда, то есть масса заряда эталонного взрывчатого вещества, при взрыве которого совершается та же работа, что и при взрыве заряда исследуемого взрывчатого вещества массой  $M$ . В качестве эталонного вещества обычно используется аммонит бЖВ.

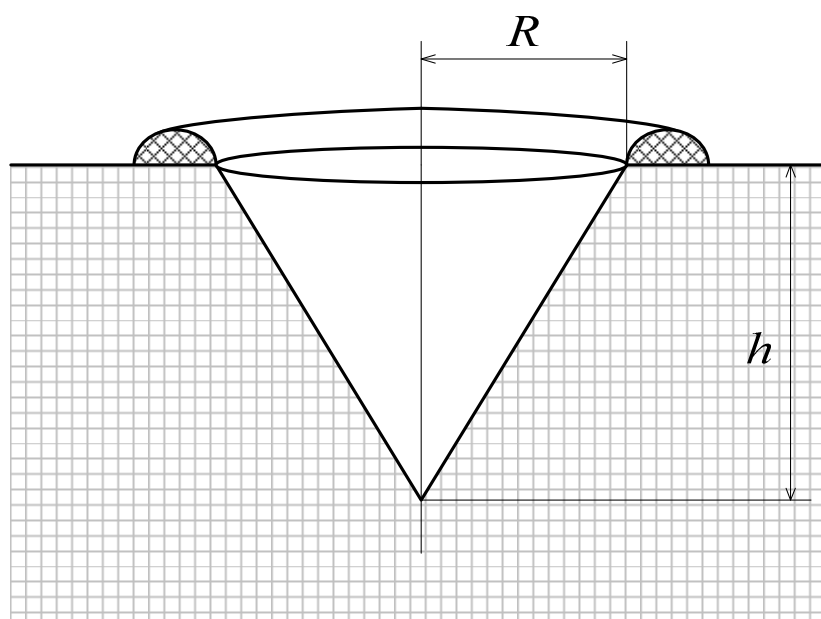


Рис. 1.5. Метод оценки работоспособности взрывчатого вещества по воронке выброса

### 2.2.6. Оценка фугасности взрывчатых веществ по измеренным параметрам ударных волн

Оценка фугасности (работоспособности) взрывчатого вещества по измеренным параметрам ударных волн проводится двумя способами – измерением импульса фазы сжатия ударной волны или избыточного давления на ее фронте.

При измерении импульса фазы сжатия волны используются специальные приборы – импульсомеры различной конструкции (маятниковые, поршневые и т.д.). При измерении избыточного давления используется датчики давления с высоким временным разрешением, в частности, пьезоэлектрические датчики.

Кроме того, величину избыточного давления можно рассчитать по измеренной скорости ударной волны:

$$\Delta p = \frac{2\rho}{k+1} (U^2 - c^2), \quad (1.11)$$

где  $\Delta p$  – избыточное давление;

$\rho$  – плотность воздуха;

$k$  – показатель адиабаты (для воздуха  $k = 1.4$ );

$u$  – скорость ударной волны;

$c$  – скорость звука в воздухе.

Для оценки фугасности взрывчатого вещества можно использовать эмпирическую формулу, полученную в результате обработки опытных данных:

$$A_g = K Q_g^{0.75} V_o^{0.25}, \quad (1.12)$$

где  $Q_g$  – теплота взрыва, Дж/кг;

$V_o$  – удельный объем газообразных продуктов взрыва, (л/кг);

$K$  – эмпирический коэффициент.

Ввиду сложности определения коэффициента  $K$ , обычно выражение (1.12) используется для нахождения относительной работоспособности. Если в качестве эталонного взрывчатого вещества взять аммонит бЖВ ( $Q_g = 4.32$  МДж/кг,  $V_o = 893$  л/кг), то формула (1.12) примет вид:

$$A_g = \frac{A_g}{A_{gв}} = \left[ \frac{Q_g}{4,32} \right]^{0,75} \left[ \frac{V_o}{893} \right]^{0,25}. \quad (1.13)$$

В литературе часто в качестве меры относительной фугасности взрывчатого вещества используется величина тротилового эквивалента, который определяется расчетным или экспериментальным путем. При этом в качестве эталонного вещества применяется тротил.

Тротиловый эквивалент – это величина, которая показывает, сколько килограммов тротила необходимо взорвать, чтобы получить такую же фугасность, как у одного килограмма исследуемого взрывчатого вещества. Если тротиловый эквивалент меньше единицы, то данное вещество мощнее тротила, и наоборот. Величина тротилового эквивалента  $T_{\text{Э}}$  для некоторых промышленных взрывчатых веществ приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тротиловый эквивалент промышленных взрывчатых веществ

Вещество	Угленит	Аммонит ПЖВ-2	Аммонит АП5ЖВ	Аммонит 6ЖВ	Тротил	Аммонит скальный
$T_{\text{Э}}$	0.39	0.57	0.65	0.81	1.00	1.08

### Задача 1

#### Определение фугасности ВВ методом свинцовой бомбы

Определить для каждого варианта работоспособность взрывчатых веществ  $\Delta V$ . Данные для каждого варианта приведены в таблице 1.2.

Объем свинцовой бомбы  $V_{\text{н}}$  до испытания определить по рисунку 1.1 (а)

Таблица 1.2

Объем бомбы после испытания

вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
взрывчатое вещество	Аммонит 6ЖВ	Тротил	Аммонит скальный	Гексоген	ТЭН	С - 4	Динамит	РВХ 9404
$V_{\text{к}}$	43545	43465	43635	43650	43655	43575	43565	43688

$V_{\text{к}}$  – Объем бомбы после испытания

## Задача 2

### Определение фугасности ВВ методом эквивалентных зарядов

Определить работоспособность взрывчатых веществ, приведенных в таблице 1.3.

Варианты и значения  $\Delta V$  для каждого варианта приведены в таблице 1.3

Таблица 1.3

Разность объёма бомбы после и до испытания

вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Взрывчатое вещество	Аммонит БЖВ	Тротил	Аммонит скальный	Гексоген	ТЭН	С – 4	Динамит	РВ Х 9404
$\Delta V$	390	310	480	495	500	450	410	533

- По графику 1.2 определить эквивалентную массу эталонного взрывчатого вещества  $M_{\text{э}}$ .
- Определить относительную фугасность (работоспособность) взрывчатого вещества по отношению к эталону
- Определить для каждого варианта величину  $A_{\text{в}}$

### Задача 3

#### Определение фугасности ВВ методом баллистического маятника

Определить работоспособность взрывчатых веществ, если длина подвеса маятника  $l=1м$ , а масса маятника  $m=40кг$ . Значения угла отклонения  $\varphi$  для каждого варианта приведены в таблице 1.4

Таблица 1.4

Значения угла отклонения баллистического маятника

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Взрывчатое вещество	Аммонит бЖВ	тротил	Аммонит скальный	Гексоген	ТЭН	С – 4	Динамит	РВХ 9404
Угол отклонения $\varphi$	89,7	78	103	105	106	99	93	111

### Задача 4

#### Определение фугасности ВВ методом баллистической mortarы

Определить работу  $A_1$ , затраченную на отклонение mortarы, работу  $A_2$ , затраченную на выброс поршня массой  $m$  и работоспособность взрывчатых веществ  $A_6$ , если длина подвесов mortarы  $l=0,5м$ , а масса mortarы  $M=5кг$ , а масса поршня  $m=0.8 кг$ . Значения угла отклонения  $\varphi$  для каждого варианта приведены в таблице 1.5

Таблица 1.5

Значения угла отклонения баллистической mortarы

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Взрывчатое вещество	Аммонит бЖВ	Тротил	Аммонит скальный	Гексоген	ТЭН	С – 4	Динамит	РВХ 9404
Угол отклонения $\varphi$	27	24	30,1	30,6	30,8	29	27,8	32

### Задача 5

#### Определение фугасности ВВ по измеренным параметрам воздушных ударных волн

Для каждого варианта рассчитать относительную работоспособность, если масса заряда  $M=10г$ . Значения масс эквивалентных зарядов  $M_{\text{э}}$  для каждого варианта приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6  
Значения масс эквивалентных зарядов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Взрывчатое вещество	Аммонит БЖВ	Тротил	Аммонит скальный	Гексоген	ТЭН	С – 4	Динамит	РВ Х 9404
$M_{\text{э}}, г$	10,0	8,2	11,2	12,1	12,3	10,7	10,4	12,9

### 3. Самостоятельная работа

Самостоятельная работа предполагает работу студентов вне аудитории с учебной и технической литературой, конспектом лекций, методичками по практическим занятиям

Список тем, выделенных на самостоятельное обучение:

1. переход горения в детонацию;
2. взрыв мучной пыли, на примере разрушений элеваторов в США;
3. пожаро — и взрывоопасные материалы и их классификация;
4. нагрузки, создаваемые взрывными волнами на различные конструкции;
5. взрыв газа и газовых баллонов в помещениях;
6. осколочное действие взрыва;
7. пожары на газо и нефтепроводах;
8. тепловой взрыв на атомных станциях;
9. критерии поражения различных объектов взрывом;
10. критерии поражения людей.

Студентам необходимо написать реферат на заданную тему объемом порядка 20 страниц (шрифт 14 пт). Предусмотрена проверка рефератов с выборочным опросом студентов по теме реферата.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Козлов В.С., Хорев И.Е. Основы физики горения и взрыва. Изд-во ТУСУРа, Томск, 2012, 141 стр.
2. Платунов Е.С., Самолетов В.А., Буравой С.Е. Физика. Словарь-справочник. – М-С. Петербург: Питер, 2005. – 496 стр.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия / У.Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др. – М.: Мир, 1986. – 319 стр.
4. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. – Москва-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2004. – 188 стр.