

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 15.11.2022 09:29:47  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668a912c4d3e7151e0a10ca4d4975e51e0

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 16 » 2021 г.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВОВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

методические указания

к проведению практической работы по дисциплине

«Управление рисками, системный анализ и моделирование»

для студентов направления подготовки

20.04.01 Техносферная безопасность

Курск 2021

УДК 371.64/.69:004

Составители: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.П. Тимофеев*.

**Расчет параметров взрывов конденсированных взрывчатых веществ:** методические указания к проведению практической работы по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова. Курск, 2021. 12 с.

В методических указаниях излагаются основные положения теории точечного взрыва, а также приводится методика расчета параметров детонационной волны при взрывах конденсированных взрывчатых веществ.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд.л. 0,72. Тираж 30 экз. Заказ     . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- изучение основных положений теории точечного взрыва и методики расчета параметров детонационной волны при взрывах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ);
- создание на ЭВМ в среде GАР программ по анализу последствий взрывов конденсированных ВВ.

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Взрыв представляет собой кратковременный процесс весьма быстрого превращения вещества с выделением большого количества энергии в небольшом объеме. Указанные превращения возникают в результате химической реакции (конденсированные, жидкие и газообразные ВВ) или ядерной. К взрывным процессам, вызванным физическими причинами, можно отнести разрушения резервуаров со сжатым газом, паровых котлов, а также мощные электрические разряды.

При взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества в атмосфере возникают воздушные ударные волны, распространяющиеся с большой скоростью в виде области сжатия – разрежения со скачком на своем фронте давления, температуры, плотности и скорости частиц среды (массовой скорости). При взрывах компактного заряда ВВ произвольной формы на расстояниях, превышающих несколько его характерных размеров, эффективность действия ударной волны эквивалентна действию заряда сферической формы. Форма фронта волны также является сферической. Таким образом, форма заряда несущественно сказывается на параметрах воздушной ударной волны на расстояниях от конструкций, представляющих практический интерес. Кроме того, масса заряда ВВ на этих расстояниях оказывается несущественной в сравнении с массой сферического объема воздуха (за фронтом ударной волны), вовлекаемого в движение. Эти обстоятельства привели к полезной абстракции, облегчающей постановку и решение задачи о расчете параметров ударных волн – схеме "точечного взрыва".

В теории точечного взрыва считается, что конечное количество энергии мгновенно выделяется в точке, т.е. масса продуктов детона-

ции пренебрежительно мала. На не слишком больших расстояниях от центра взрыва давление в волне значительно выше атмосферного (сильная ударная волна), и атмосферным давлением пренебрегают. Решение без учета атмосферного противодействия является автомодельным (самоподобным). На расстояниях, где давление в волне становится соизмеримым с атмосферным, формируется задача о точечном взрыве с учетом противодействия. Такая задача является неавтомодельной и в общем случае может быть решена только численными методами на ЭВМ. Полное решение автомодельной задачи о точечном взрыве в замкнутом виде дано Л.И. Седовым (1946 г.). В связи с развитием вычислительной техники теория точечного взрыва интенсивно развивается на неавтомодельные и неоднородные задачи, а также на ситуации, связанные с фазовыми переходами и излучением. Задачу о точечном взрыве обычно формулируют для трех видов симметрии: сферической, цилиндрической и плоской. Цилиндрическая симметрия относится к зарядам, распределенным вдоль некоторой прямой, а плоская – к зарядам, расположенным в некоторой плоскости. Эффект действия ударных волн зависит как от вида симметрии, так и от расположения точки (линии, плоскости) взрыва относительно земной поверхности.

При воздушном взрыве ударная сферическая волна достигает земной поверхности и отражается от нее (рис. 1). На некотором расстоянии от эпицентра взрыва (проекция центра взрыва на земную поверхность) фронт отраженной волны сливается с фронтом падающей, вследствие чего образуется так называемая головная волна с вертикальным фронтом, распространяющаяся от эпицентра вдоль земной поверхности. Ближняя зона, где отсутствует слияние фронтов, называется зоной регулярного отражения, а дальняя зона, в которой распространяется головная волна, – зоной нерегулярного отражения (ниже траектории тройной точки слияния трех фронтов). В ближней зоне при умеренной высоте взрыва давление в ударной волне очень велико. Поэтому наибольший интерес представляют данные об ударной волне в дальней зоне.

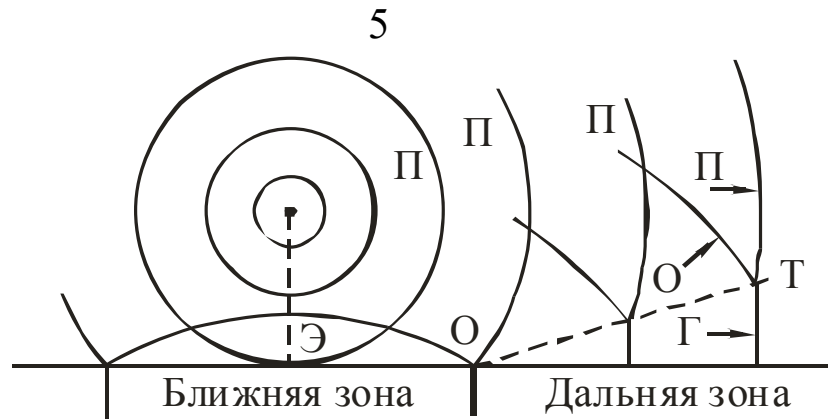


Рис. 1. Схема волнообразования при воздушном взрыве:

Э — эпицентр взрыва; П — фронт падающей волны; О — фронт отраженной волны; Г — фронт головной ударной волны; Т — траектория тройной точки.

Характер воздушной ударной волны при наземном взрыве (за пределами воронки) соответствует дальней зоне воздушного взрыва. Таким образом, как при воздушном, так и при наземном взрывах обычно рассматривают воздушную ударную волну, распространяющуюся от эпицентра с вертикальным фронтом.

С момента прихода фронта воздушной ударной волны в точку на земной поверхности давление резко повышается до максимального значения  $P_\phi$  (рис. 2), а затем убывает до атмосферного  $P_0$  и ниже атмосферного.

Период  $\tau_+$  повышенного избыточного (сверх атмосферного) давления  $\Delta P = P - P_0$  называется фазой сжатия, а период  $\tau_-$  пониженного давления  $\Delta P < 0$  — фазой разрежения. Одновременно с давлением в ударной волне возникает движение воздушной среды от эпицентра (центра) взрыва. Законы изменения массовой скорости  $v$  и плотности  $\rho$  среды во времени качественно аналогичны изменению давления, однако вследствие инерционности воздушного потока период  $\tau_{+ск}$  положительной фазы скоростного напора  $P_{ск} = \frac{1}{2} \rho v^2 > 0$  несколько больше, чем  $\tau_+$ . Избыточное давление в волне и скоростной напор являются важнейшими характеристиками ударной волны, определяющими эффект ее воздействия на сооружение.

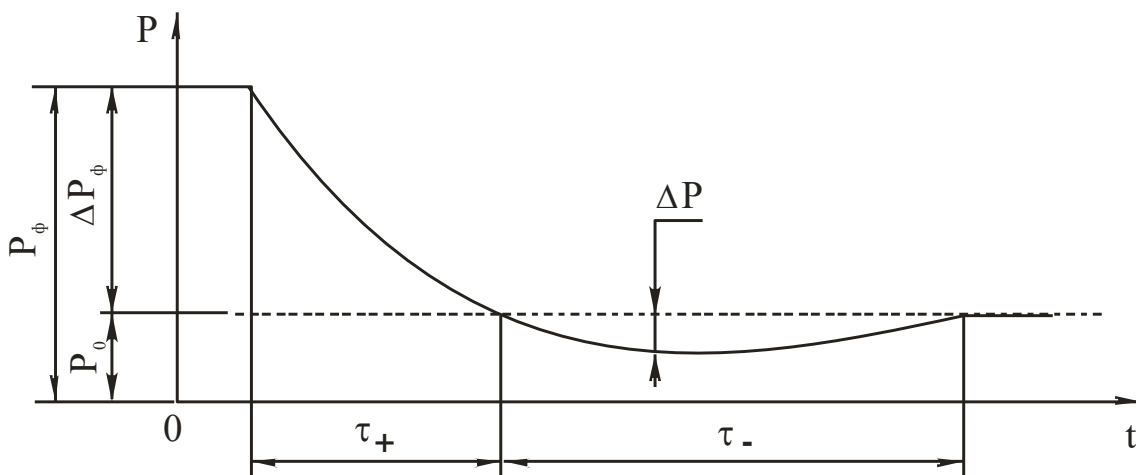


Рис. 2. Изменение давления в ударной волне со временем в фиксированной точке

По мере распространения ударной волны ее интенсивность убывает, скорость продвижения фронта волны уменьшается, и на значительных расстояниях от эпицентра ударная волна вырождается в акустическую. Основными параметрами, определяющими интенсивность ударной волны, являются избыточное давление на фронте  $\Delta P_\phi$  и длительность фазы сжатия  $\tau_+$ . Эти параметры зависят от массы  $C$  заряда ВВ определенного типа (т.е. энергии взрыва), высоты  $H$ , условий взрыва и расстояния  $R$  от эпицентра.

М.А. Садовский – один из первых исследователей поля взрыва экспериментально установил, что основные параметры ударной волны подчиняются законам подобия. Эти законы имеют большое практическое значение, так как применимы для широкого диапазона энергий взрыва. Пусть для заряда ВВ, например, из тротила (тринитротолуол, ТНТ) массой  $C_1$  на расстоянии  $R_1$  известны параметры на фронте ударной волны (давление, плотность, скорость частиц), а также временные параметры ( $\tau_+$ ,  $\tau_{+сж}$  и время  $\tau^*$  прихода фронта волны). Тогда те же параметры на фронте ударной волны взрыва заряда с массой  $C_2$  будут на расстоянии  $R_2$ , причем это расстояние и временные параметры (которые на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$ , м, соответственно обозначим  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ) определяются по формулам (закона подобия кубического корня):

$$R_2 = R_1 \sqrt[3]{C_2/C_1}, \quad \tau_2 = \tau_1 \sqrt[3]{C_2/C_1}. \quad (1)$$

Если ввести величину

$$\bar{R} = R/\sqrt[3]{C}, \quad (2)$$

где  $C$  – тротиловый эквивалент, кг, то закон подобия можно сформулировать как равенство параметров на фронте волны на равных "приведенных" расстояниях  $\bar{R}$ , м/кг<sup>1/3</sup>. Для воздушных взрывов на высоте  $H$ , м, для соблюдения подобия необходимо иметь также равенство "приведенных" высот

$$\bar{H} = H/\sqrt[3]{C}.$$

Важной характеристикой ударной волны является ее удельный импульс  $I$ , кПа·с, определяемый для фазы сжатия ( $0 < t < \tau_+$ ) по формуле

$$I = \int_0^{\tau_+} \Delta P(t) dt = AC^{2/3}/R, \quad A \approx 0.4, \quad (3)$$

где  $\Delta P(t)$  – функция, характеризующая изменение избыточного давления за фронтом ударной волны во времени.

Удельный импульс положительной фазы скоростного напора определяют аналогично, но вместо  $\Delta P(t)$  под интегралом (3) берут функцию  $P_{ск}(t)$ , характеризующую изменение скоростного напора в интервале  $0 < t < \tau_{+ск}$ . Согласно закону подобия на расстояниях  $R_1, R_2$ , соответствующих формуле (1), импульсы  $I_1$  и  $I_2$  связаны соотношением

$$I_2 = I_1 \sqrt[3]{C_2/C_1}. \quad (4)$$

Импульс фазы разрежения играет сравнительно меньшую роль, а его значение отрицательно, т.е. полный импульс несколько меньше импульса фазы сжатия.

Параметры воздушной ударной волны определяют по формулам М.А. Садовского, в которых вид взрывчатого вещества учитывается тротиловым эквивалентом по ударной волне.

Давление  $\Delta P_\phi$ , МПа, для свободно распространяющейся сферической воздушной ударной волны определяют по формуле

$$\Delta P_\phi = \frac{0.084}{\bar{R}} + \frac{0.27}{\bar{R}^2} + \frac{0.7}{\bar{R}^3}. \quad (5)$$

Мощность контактного взрыва на неразрушаемой преграде удваивается в связи с формированием полусферической волны. Поэтому для наземных взрывов величина тротилового эквивалента  $C$  в (2)

умножается на  $2\eta$ , где коэффициентом  $\eta < 1$  учитывается расход энергии на образование воронки в грунте. Для средних грунтов  $\eta = 0.6 \dots 0.65$ , для плотных суглинков и глины  $\eta = 0.8$ .

Максимальное избыточное давление на поверхности земли при воздушном взрыве зависит от высоты взрыва  $H$ , однако при взрывах на небольшой высоте и на расстояниях  $R > H$  (дальняя зона) максимум давления приближенно можно оценить по формуле (5).

Длительность фазы сжатия  $\tau_+$ , с, для наземного и приземного взрывов, определяют по формуле

$$\tau_+ = 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{C} \sqrt{R}. \quad (6)$$

Скоростной напор на фронте ударной волны  $P_{сф}$  определяют по формуле (10), а длительность  $\tau_{+ск}$  в зависимости от давления характеризуется следующими значениями отношений  $\tau_{+ск} / \tau_+$ :

$\Delta P_{\phi} / P_0$	0.1	0.5	1	5	10	100
$\tau_{+ск} / \tau_+$	1.15	1.50	1.65	2.5	2.15	1.83

Для использования приведенных формул при расчете параметров волн при взрывах различных химических ВВ с теплотой взрыва  $Q_v$  величину  $C$  следует корректировать умножением на коэффициент, равный отношению  $Q_v$  данного ВВ и тротила согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Теплота взрыва распространенных промышленных ВВ

Взрывчатое вещество	$Q_v$ , кДж/кг	Взрывчатое вещество	$Q_v$ , кДж/кг
Тротил (ТНТ)	4240	Тринитрохлорбензол	4240
Гексоген	5540	Нитрогуанидин	3020
ТЭН	5880	Дымный порох	2790
Динитробензол	3650	Пироксилин	4370



Взрывчатое вещество	$Q_v, \text{кДж/кг}$	Взрывчатое вещество	$Q_v, \text{кДж/кг}$
Тротил (ТНТ)	4240	Тринитрохлорбензол	4240
Гексоген	5540	Нитрогуанидин	3020
ТЭН	5880	Дымный порошок (N=13,3%)	2790
Тринитробензол	4520	Аммотол 80/20	4200
Пикрат аммония	3360	Октоген	5420
Тринитроанилин	4160	Гликольдинитрат	6640
Аммонийная селитра	1440	Оксиликвиты (поглотители: торф, уголь, мох, древесная мука)	3800... ...4200
Пентолит 50/50: 50% ТЭН + 50% ТНТ	4800		

Расчет параметров на фронте ударной волны проводится на основе приведенных ниже соотношений. Применяемые далее индексы " $\phi$ " и " $0$ " относятся к параметрам на фронте ударной волны и в невозмущенной среде соответственно, причем параметры с индексом " $0$ " обычно принимаются по данным международной стандартной атмосферы на уровне моря (МСА):

$$P_0 = 0.101325 \text{ МПа}, \rho_0 = 1.2249 \text{ кг/м}^3, T_0 = 288.16 \text{ К}.$$

Если известной считать величину  $\Delta P_\phi$ , которая может быть получена по формуле (5), то скорость распространения фронта ударной волны ( $D_\phi, \text{м/с}$ ), скорость движения воздушной среды ( $v_\phi, \text{м/с}$ ) и ее плотность ( $\rho_\phi, \text{кг/м}^3$ ) определяются из следующих выражений:

$$v_\phi = \frac{S_0 \Delta P_\phi^*}{\gamma \sqrt{1 + \frac{\Delta P_\phi^* (\gamma + 1)}{2\gamma}}}, \quad (7)$$

$$D_\phi = S_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta P_\phi^* (\gamma + 1)}{2\gamma}}, \quad (8)$$

$$\rho_{\phi} = \rho_0 \frac{1 + \frac{\Delta P_{\phi}^* (\gamma + 1)}{2\gamma}}{1 + \frac{\Delta P_{\phi}^* (\gamma - 1)}{2\gamma}}, \quad (9)$$

где  $S_0 = 344$  м/с – скорость звука в атмосфере,  $\gamma$  – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме для совершенного газа (для воздуха  $\gamma = 1.4$ ),  $\Delta P_{\phi}^* = \Delta P_{\phi} / P_0$ .

Скоростной напор на фронте ударной волны рассчитывается из выражения

$$P_{\text{скф}} = \frac{\Delta P_{\phi} \Delta P_{\phi}^*}{(\gamma - 1)\Delta P_{\phi}^* + 2\gamma}. \quad (10)$$

Температура  $T_{\phi}$  на фронте ударной волны определяется по формуле

$$T_{\phi} = \frac{T_0 (1 + \Delta P_{\phi}^*)}{\rho_{\phi} / \rho_0}. \quad (11)$$

При давлениях  $\Delta P_{\phi} < 10$  МПа формулы (7)...(11) преобразуются к виду

$$v_{\phi} = \frac{5/7 S_0 \Delta P_{\phi}^*}{\sqrt{1 + 6/7 \Delta P_{\phi}^*}}, \quad (12)$$

$$D_{\phi} = S_0 \sqrt{1 + 6/7 \Delta P_{\phi}^*}, \quad (13)$$

$$\rho_{\phi} = \frac{\rho_0 (6\Delta P_{\phi}^* + 7)}{\Delta P_{\phi}^* + 7}, \quad (14)$$

$$P_{\text{скф}} = \frac{5/2 \Delta P_{\phi} \Delta P_{\phi}^*}{\Delta P_{\phi}^* + 7}, \quad (15)$$

$$T_{\phi} = \frac{T_0 (1 + \Delta P_{\phi}^*) (7 + \Delta P_{\phi}^*)}{6\Delta P_{\phi}^* + 7}. \quad (16)$$

Для оценки поражающего действия ударной волны на людей и сооружения используется ряд методик, основанных на вероятностном подходе. В них учитываются значения предельного давления на фронте ударной волны  $\Delta P_\phi$ , удельного импульса  $I$  и длительности волнового давления  $\tau_+$ . Хотя в данной работе они не рассматриваются, однако для приближенной оценки риска поражения людей можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Давления ударной волны, вызывающие поражения человека различной степени

$\Delta P_\phi$ , кПа	Результат воздействия
20	Разрывы барабанных перепонок. Небольшие кровоизлияния в легкие
50	Кроме указанного выше, общее сотрясение организма, болезненный удар по голове, кровоизлияние в легкие, межмышечное кровоизлияние, гиперемия мозга, иногда перелом ребер
70	Давление, трудно переносимое организмом, вызывающее состояние контузии
100...150	Переломы ребер, гиперемия сосудов мягкой мозговой оболочки
300	Летальный исход

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для заданного преподавателем вида взрывчатого вещества массой 1000 кг рассчитать параметры детонационной волны наземного взрыва и оценить степень поражения населения. Для этого:

1. Составить на ЭВМ в среде GАР программу по расчету параметров взрыва. Для нахождения периода  $\tau_{+ск}$  положительной фазы скоростного напора на основе приведенных в указаниях табличных данных определить аппроксимирующую функцию, используя встроенные в GАР средства интерполяции сплайнами.

2. Построить графики зависимостей параметров ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва ( $R = 10...1000 \text{ м}$ ).

3. Оценить риск поражения населения, находящегося в районе взрыва. Для этого, используя данные табл.2, рассчитать на местности границы характерных зон поражения, и, далее, площади зон. При определении количества попавших в область взрыва людей плотность населения принять равной 1 человек на  $100 \text{ м}^2$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Листинг написанной в среде GАР программы расчета параметров взрыва конденсированных ВВ.
4. Графики зависимостей параметров ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва.
5. Таблица с результатами расчета людских потерь по зонам поражения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение взрыва.
2. Объясните, почему при расчетах параметров взрывов применяется модель "точечного взрыва".
3. Поясните схему волнообразования при воздушном взрыве.
4. Перечислите характеристики ударной волны.
5. Какому закону подчиняются основные параметры ударной волны и в чем его суть?

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



### **ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ**

Методические указания к проведению  
практических работ по дисциплине

«Управление рисками, системный анализ и моделирование»  
для студентов направления подготовки 20.04.01  
«Техносферная безопасность»

Курск 2021

УДК 371.64/.69:004

Составители: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.П. Тимофеев.*

**Оценка поражающего действия воздушной ударной волны:** методические указания к проведению практических работ по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданову. Курск, 2021. 15 с.

В методических указаниях излагается методика расчета воздействия аварийных взрывов на городские объекты и оценки риска поражения людей от барического и метательного действия ударной волны.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд.л. 0,83. Тираж 30 экз. Заказ     . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- изучение методики расчета воздействия аварийных взрывов на городские и другие объекты, а также оценки риска поражения людей от барического и метательного действия ударной волны;
- создание на ЭВМ в среде GАР программ по анализу последствий аварийных взрывов.

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

## 1. Действие на объекты

Воздушная ударная волна взрыва вызывает разрушения или повреждения зданий городской застройки, промышленных зданий и сооружений, систем электро-, газо- и водоснабжения, транспортных средств. Степень разрушения определяется мощностью взрыва, расстоянием до центра взрыва, характеристиками объекта, а также условиями взаимодействия с ним ударной волны.

Различают четыре степени разрушений зданий и объектов: полное, сильное, среднее и слабое. При полном разрушении обрушивается большая часть стен, колонн и перекрытий. Сильное – характеризуется частичным разрушением стен (колонн) и перекрытий; легкие элементы (двери, перегородки, крыши) разрушаются полностью или частично. Среднее разрушение определяется тем, что основные ограждающие и несущие конструкции получают деформации (прогибы), а разрушаются, в основном, второстепенные конструкции. Слабое разрушение соответствует повреждению или серьезным деформациям отдельных легких элементов ограждения (окна, двери, крыши домов). Полное разрушение на сетях коммунально-энергетического хозяйства характеризуется выходом из строя значительных участков трубопроводов, разрывом кабеля, обрушением опор воздушных линий электропередач.

Результат воздействия ударной волны на различные конструкции зависит от давления на фронте волны  $\Delta P_\phi$  и импульса  $I$  (или длительности фазы сжатия  $\tau_+$ ), а также от жесткостных, массовых и прочностных параметров конструкции.

Для объектов конкретного типа результат воздействия можно представить на плоскости  $I - \Delta P_\phi$  (рис. 1) с областями, разграниченными линиями различных степеней повреждений. Как показывает опыт, лишь небольшая зона (**A** - на рисунке) характеризуется зависимостью как от давления, так и от импульса. Остальная часть плоскости занята асимптотическими прямыми  $\Delta P_\phi = const$  (зона **B**), в которой влияние импульса весьма мало или отсутствует вовсе, и прямыми  $I = const$  (зона **C**), где не ощущается влияние давления. Т.е. в зоне **B**, в которой длительность  $\tau_+$  давления значительно больше времени  $\tau$  релаксации объекта ( $\tau_+ / \tau \gg 1$ ), результат воздействия определяется только давлением  $\Delta P_\phi$ , а в зоне **C** ( $\tau_+ / \tau \ll 1$ ) – только импульсом  $I$ . Величина  $\tau$  здесь представляет оценку времени достижения конструкцией экстремумов напряженно-деформированного состояния. Для упругих систем  $\tau$  можно сопоставить периоду  $T$  собственных колебаний.

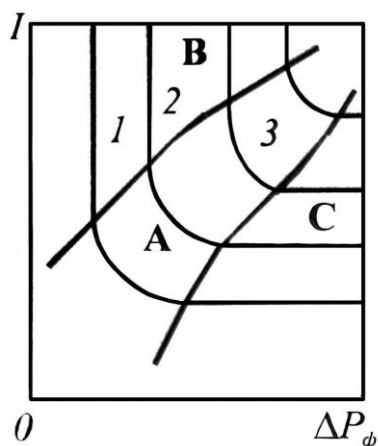


Рис. 1. Схема диаграммы поражения ударной волной объекта (цифрами обозначены границы областей повреждений по возрастанию их степеней)

Границы различных степеней разрушений зданий по результатам бомбардировок в Великобритании аппроксимированы уравнением

$$R = \frac{K \cdot \sqrt[3]{C}}{\sqrt[6]{1 + (3180/C)^2}}, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние, м;  $C$  – тротильный эквивалент массы заряда взрывчатого вещества (ВВ), кг;  $K$  – коэффициент, равный: 3.8 – для



полного разрушения зданий; 5.6 – 50% зданий полностью разрушено; 9.6 – здания непригодны для обитания; 28 – умеренные разрушения, повреждения внутренних малопрочных перегородок; 56 – малые повреждения зданий, разбито 10% стекол.

Переход от расчетов по формуле (1) к диаграмме типа рис. 1 осуществляется посредством соотношений, связывающих параметры ударной волны с величинами  $R$  и  $C$ . Зависимости давления  $\Delta P_\phi$ , МПа, скоростью напора  $\Delta P_{ск}$ , МПа, и импульса  $I$ , кПа·с, от расстояния  $R$ , м, и массы заряда ВВ  $C$ , кг, таковы:

$$\Delta P_\phi = \frac{0.084}{R} + \frac{0.27}{R^2} + \frac{0.7}{R^3}, \quad \bar{R} = R / \sqrt[3]{C}; \quad (2)$$

$$P_{ск} = \frac{\frac{5}{2} \Delta P_\phi \cdot \Delta P'_\phi}{\Delta P'_\phi + 7}, \quad \Delta P'_\phi = \frac{\Delta P_\phi}{P_0}; \quad (3)$$

$$I = 0.4 \cdot C^{2/3} / R. \quad (4)$$

При взрыве зона действия продуктов детонации, расширяясь, достигает примерно пятнадцати радиусов заряда (рис. 2).

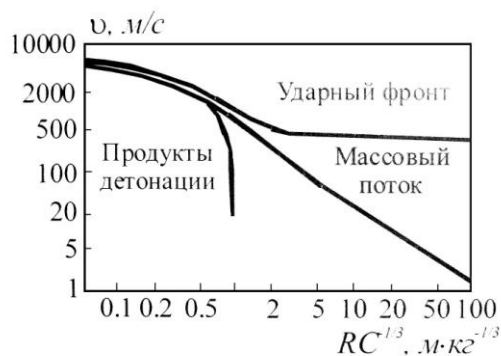


Рис. 2. Зависимость скоростей ударного фронта, массового потока и фронта продуктов детонации от приведенного расстояния при взрыве заряда тротила в воздухе

Для больших расстояний  $R$ , м, (несколько десятков километров) избыточное давление  $\Delta P_*$ , МПа, отраженной от земли ударной волны взрыва с эквивалентом  $C$ , кг, может быть определено по формуле:

$$\Delta P_* = 0.272 \cdot C^{0.4} \cdot R^{-1.2} (10 \cdot P_0)^{0.6} \cdot F.$$

Здесь  $P_0$  – атмосферное давление, МПа;  $F \approx 3.3$  – коэффициент усиления ударной волны, связанный с атмосферными волноводами и фо-

кусировкой вследствие температурной инверсии приземного слоя воздуха и струйных ветровых потоков в атмосфере.

На рис. 3 приведена диаграмма повреждения кирпичных зданий (применима также для некирпичных небольших административных построек, легких промышленных каркасных сооружений). Асимптотические значения границ областей с различными степенями  $W$  повреждений зданий следующие:

Повреждения	$\Delta P_{\phi}$ , кПа	$I$ , кПа·с	$W$
Минимальное повреждение (разрыв соединений, расчленение конструкций)	4.5	0.12	0.15
Значительное повреждение элементов, несущих нагрузку	18.0	0.30	0.4
Частичное разрушение (50...70% стен разрушено или на грани разрушения)	40.0	0.50	0.8

При расчетах с использованием диаграммы  $\Delta P - I$  степень повреждения  $W$  определяется линейной интерполяцией между значениями, соответствующими границам области, в которую попадают действующие на объект давление и импульс.

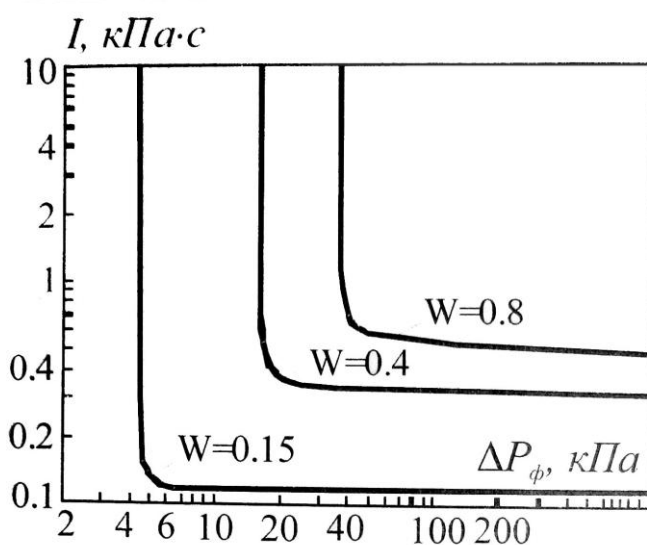


Рис. 3. Экспериментальная диаграмма повреждения кирпичных зданий

Наиболее достоверные данные о возможных разрушениях объекта получают его динамическим расчетом. Такой прочностной расчет проводят для особо ответственных сооружений с фиксацией мощности и положения центра взрыва. Возможно также использование приближенных инженерных методов расчета на эквивалентные статические нагрузки, устанавливаемые с помощью коэффициентов динамичности. Коэффициенты динамичности определяют по параметрам ударной волны и основной частоте собственных колебаний конструкции  $\omega$ , т.е. по величине, обратной периоду  $T$ .

Периоды собственных колебаний зданий с жесткой конструктивной схемой оценивают по эмпирическим формулам в зависимости от различных параметров. Следующие формулы для  $T$  дают ориентировочные значения периодов:

$$T = \alpha \cdot n, \quad T = 0.017 \cdot H, \quad T = 0.0905 - H/\sqrt{B}, \quad T = 0.3 \cdot H/\sqrt{B \cdot g}.$$

Здесь  $n$  – число этажей,  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от конструкции здания и вида основания (при средней плотности грунтов основания  $\alpha = 0.04 \dots 0.09$ ),  $H$  – высота здания, м;  $B$  – ширина или длина здания, м;  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения. Опытные значения периодов  $T$  для различных типов зданий и сооружений приведены в табл. 1. Для крупных взрывов, когда допустима оценка степени повреждения по давлению, ориентируются на значения  $\Delta P_\phi$ , приведенные в табл. 2.

Для оценки возможных последствий воздействия ударной волны на объект давление  $\Delta P_\phi^*$ , рассчитываемое по формуле (2), корректируют с помощью коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$

$$\Delta P_\phi = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \Delta P_\phi^*, \quad (5)$$

где  $\Delta P_\phi$  – расчетное давление, сопоставляемое с данными табл. 2;  $K_1$  – коэффициент ориентации объекта на центр возможного взрыва;  $K_2$  – коэффициент экранировки, учитывающий возможное затенение объекта соседними сооружениями застройки;  $K_3$  – коэффициент перфорации, отражающий влияние проемности (отношение  $\alpha$  площади остекления к полной поверхности стеновых ограждений).

Неблагоприятной считается ориентация наибольшей стены по нормали к направлению распространения ударной волны (рекомендуется  $K_1 \cong 1.1$ ), благоприятной – при расположении стен под углом  $\sim 45^\circ$  ( $K_1 \cong 0.8$ ); для промежуточных положений объекта (нейтральных) принимают  $K_1 = 1$ .

Таблица 1 - Периоды собственных колебаний зданий и сооружений

Здание	Число этажей	Поперечные $T, c$	Продольные $T, c$	
Жилое с несущими каменными стенами	3	0.15	0.16	
	5	0.26	0.22	
	6	0.37...0.39	-	
	8	0.43	0.43	
Школьное с несущими кирпичными стенами	3	0.22	0.21	
	4	0.30	0.27	
	5	0.32	-	
Жилое крупнопанельное	4	0.16	0.15	
	5	0.30	0.22	
	6	0.36	-	
	9	0.40	0.32	
Жилое сборное каркасно-панельное	14	0.86	0.76	
	16	1.20	0.76	
Жилое с нижним каркасным и верхними крупнопанельными этажами	4	0.28	0.30	
	10	0.64	0.44	
	18	1.14	1.05	
Административное каркасное с кирпичным заполнением:				
	железобетонный каркас	12	0.69...0.96	0.62...0.89
	стальной каркас	12	1.17	1.12
Административное каркасное	22	1.10	1.16	

Таблица 2 - Оценка поражающего действия ударной волны на объекты по давлению (зона **В** на рис. 1)

Объект	Давление $\Delta P_{\phi}$ , кПа, соответствующее степени разрушения			
	Полное	сильное	среднее	слабое
<b>Жилые и промышленные здания</b>				
Кирпичные многоэтажные	30...40	20...30	10...20	8...10
Кирпичные малоэтажные	35...45	25...35	15...25	8...15
Деревянные	20...30	12...20	8...12	6...8
Промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом	60...100	50...60	40...50	20...40
Промышленные здания бескаркасной конструкции и легким металлическим каркасом	60...80	40...50	30...40	20...30
<b>Сооружения и сети городского коммунального хозяйства, энергетики, связи</b>				
Тепловые электростанции	10...15	15...20	20...25	25...40
Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10...15	15...25	25...35	35...45
Подземные сети коммунального хозяйства (водопровод, канализация, газ)	1500	1000...1500	600...1000	400...600
Трубопроводы наземные	20	50	130	—
Трубопроводы на эстакадах	20...30	30...40	40...50	—

Объект	Давление $\Delta P_{\phi}$ , кПа, соответствующее степени разрушения			
	Полное	сильное	среднее	слабое
Смотровые колодцы и за- движки сетей коммунального хозяй- ства	1500	1000	300	200
Трансформаторные подстан- ции	100	40...60	20...40	10...20
Водонапорные башни	70	40...60	20...40	10...20
Антенные устройства	10...20	20...30	30...40	>40
Высоковольтные линии электропередач	120...20 0	80...120	50...70	20...40
Кабельные подземные линии	1500	1000...1 500	800...100 0	до 800
<b>Сооружения транспорта</b>				
Шоссейные дороги с асфаль- товым и бетонным покрыти- ем	4000	3000	1500	300
Металлические и железобе- тонные мосты пролетом до 50 м	250... 300	200...25 0	150...200	100...150
Взлетно-посадочные полосы аэродромов	4000	3000	1500	400
Железнодорожные пути	400	250	175	125
Силовые линии электрофи- цированных железных дорог	120	100	60	40
<b>Транспорт, подвижная техника, хранилища</b>				
Тепловозы с массой до 50 т	90	70	50	40
Вагоны товарные деревян- ные	40	35	30	15
Цистерны для перевозки по железным дорогам сжижен- ных газов, нефтепродуктов	80	70	50	30
Цельнометаллические ваго- ны крытые	150	90	60	35

Объект	Давление $\Delta P_\phi$ , кПа, соответствующее степени разрушения			
	Полное	сильное	среднее	слабое
Землеройно-дорожно-строительные машины	300	200	125	80
Пожарные машины	70	50	35	10
Резервуары и емкости стальные наземные	90	80	55	35
Газгольдеры и хранилища ГСМ и химических веществ	40	35	25	20
Частично заглубленные резервуары для хранения нефтепродуктов	100	75	40	20
Подземные резервуары	200	150	75	40

Для промышленных и гражданских зданий с проемами значение  $K_3$  принимают равным:

$\alpha$	0...0.3	0.3...0.5	0.5...0.7	>0.7
$K_3$	1.1	1	0.9	0.85

а для других объектов берется  $K_3 = 1$ .

При расположении объекта на открытой территории (а также, когда расстояние до ближайшего строения превышает 50...70 м) коэффициент  $K_2 = 1$ . При наличии экранирующих построек, расположенных на линии распространения ударной волны на расстояниях менее 50 м, принимают значение коэффициента  $K_2 = 0.7...0.9$  в зависимости от степени затенения.

## 2. Действие ударных волн на людей

Поражающее действие ударной волны на человека также определяется давлением  $\Delta P_\phi$  и импульсом  $I$ . На рис. 4-6 приведены графики функций риска поражения людей от однократного барического и ме-

тательного действия взрывной волны. На рис. 4 приведена диаграмма вероятности выживания  $\lambda$  открыто стоящего человека при поражении его органов дыхания (легких) в зависимости от параметров ударной волны - давления и импульса. По оси ординат отложено безразмерное давление  $P_s$ , а по оси абсцисс - приведенный импульс  $I_s$ .

$$P_s = \frac{\Delta P_m + P_{ск}}{P_0}, \quad I_s = \frac{I}{\sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m}}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_m$  – амплитуда избыточного давления взрывной волны, Па;  $P_0$  – атмосферное давление, Па;  $I$  – удельный импульс, Па·с;  $P_{ск}$  – максимум скоростного напора, Па;  $m$  – масса тела человека, кг. Для взрывов зарядов бризантных ВВ  $\Delta P_m = \Delta P_\phi$ .

Асимптотические значения границ областей с различной вероятностью  $\lambda$  выживания человека следующие:

$P_s$	0.9	3	5	6	7	8
$I_s, \text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1/3}$	0.2	1.0	1.35	1.8	2.3	3.0
$\lambda$	1	0.99	0.9	0.5	0.1	0.01

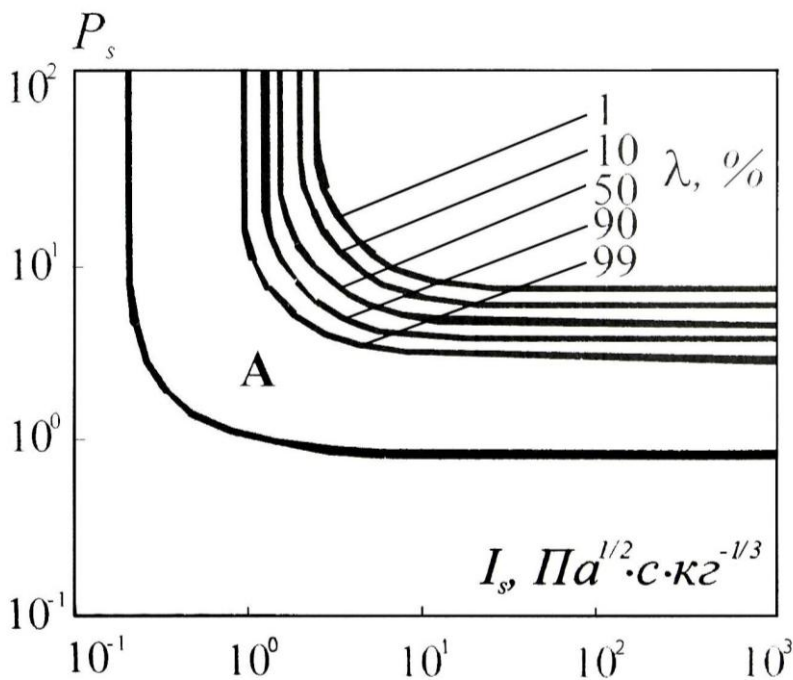


Рис. 4. Вероятность выживания  $\lambda$  при поражении органов дыхания человека в зависимости от приведенных параметров ударной волны (А - порог поражения)



Вероятность поражения  $G$  представляет дополнение  $\lambda$  до единицы  
 $G = 1 - \lambda$  (7)

Опасным для человека является избыточное давление  $\Delta P_\phi > 6.9 \text{ кПа}$ .  
 Травмы барабанных перепонок возможны при  $\Delta P_\phi > 35 \text{ кПа}$ . На рис. 6  
 приведена зависимость вероятности разрыва барабанной перепонки  
 человека от избыточного давления  $\Delta P_\phi$ .

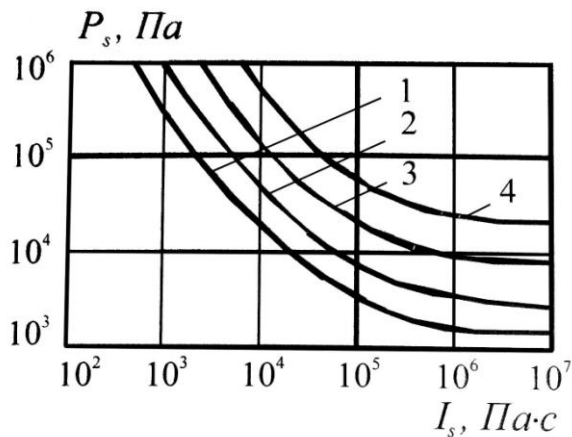


Рис. 5. Диаграмма оценки поражения человека метательным действием взрыва. Кривым соответствуют скорости отброса тела человека:  
**1** -  $3 \text{ м/с}$  (безопасность), **2** -  $6.5 \text{ м/с}$  (порог поражения), **3** -  $16.5 \text{ м/с}$   
 (50 % потерь), **4** -  $42 \text{ м/с}$  (100% потерь)

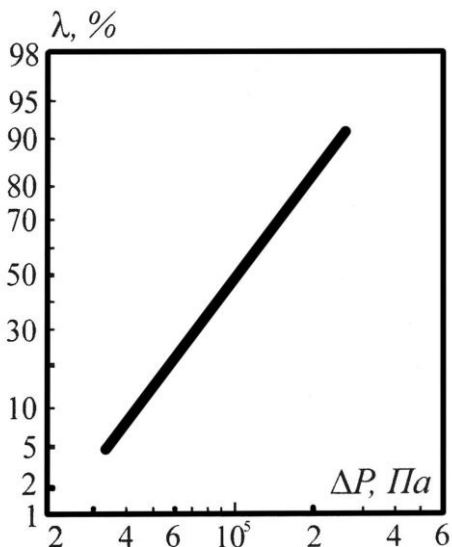


Рис. 6. Вероятность  $\lambda$  разрыва барабанной перепонки человека в зависимости от давления в ударной волне

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для заданного преподавателем вида взрывчатого вещества массой 1000 кг и расположения эпицентра взрыва на местности рассчитать параметры детонационной волны наземного взрыва, оценить степени разрушения городских объектов и поражения населения. Для этого:

1. Используя созданную в лабораторной работе «Расчет параметров взрывов конденсированных взрывчатых веществ» программу по расчету параметров взрыва и выражение (5), провести оценку поражающего действия ударной волны на объекты. В качестве рассматриваемых объектов взять здания и сооружения, находящиеся в 200-метровой зоне от эпицентра взрыва.

2. Оценить риск поражения населения, находящегося в районе взрыва. Для этого, используя формулы (6), (7) и рис.4-6, рассчитать на местности границы характерных зон поражения. При определении количества попавших в область взрыва людей плотность населения принять равной 1 человек на  $100 \text{ м}^2$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Листинг написанной в среде GАР программы оценки степени разрушения городских объектов и поражения населения.
4. Карта местности с изображенными на ней городскими объектами, подвергнутыми воздействию аварийного взрыва, и с нанесенными на ней зонами поражения человека.
5. Таблица с описанием объектов и сооружений с соответствующими степенями разрушения.
6. Таблицы с результатами расчета людских потерь по зонам поражения.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Перечислите степени разрушения зданий и объектов.
2. В какой форме представляется результат воздействия аварийного взрыва?
3. Какие пути существуют для получения данных о возможных разрушениях объекта?
4. Почему необходима корректировка значений избыточного давления в при оценке последствий аварийного взрыва и в чем ее суть?
5. С помощью каких зависимостей можно проанализировать действие ударных волн на человека?

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



## **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВОВ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ**

методические указания  
к проведению практической работы по дисциплине  
«Управление рисками, системный анализ и моделирование»  
для студентов направления подготовки  
20.04.01 Техносферная безопасность

Курск 2021

УДК 371.64/.69:004

Составители: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.П. Тимофеев.*

**Расчет параметров взрывов газопаровоздушных смесей:** методические указания к проведению практической работы по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова. Курск, 2021. 17 с.

В методических указаниях излагается методика расчета параметров детонационной волны при взрывах газопаровоздушных смесей в открытом пространстве.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,98. Уч.-изд.л. 0,94. Тираж 30 экз. Заказ                      . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- изучение методики расчета параметров детонационной волны при взрывах газопаровоздушных смесей в открытом пространстве;
- создание на ЭВМ в среде GАР программ для анализа последствий взрывов газопаровоздушных смесей.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1. Взрывы газопаровоздушных смесей в открытом пространстве

Взрывы газопаровоздушных и пылевоздушных смесей образуют класс объемных взрывов. Если взрывы пыли происходят в замкнутых объемах (помещениях), то взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) могут происходить как в помещениях, так и в неограниченном пространстве.

Взрывы ГПВС в помещениях (зданиях) возникают в результате утечки газа из элементов оборудования. Взрывы ГПВС могут также возникать в емкостях (резервуарах, газгольдерах, цистернах, грузовых отсеках танкеров) для хранения и транспортировки взрыво- и пожароопасных веществ. Взрывы смесей горючих газов с воздухом с тяжелыми последствиями происходят на шахтах.

Взрывы ГПВС в неограниченном пространстве могут происходить в результате разрушений газопроводов, разлива сжиженного горючего газа, его испарения с переходом в детонацию. Известно большое число аварийных взрывов резервуаров с большим количеством сжиженного горючего газа, сопровождаемых образованием осколочного поля.

В зависимости от давления  $P$  и температуры  $T$  вещество может находиться в различных агрегатных состояниях (рис.1). Для сжижения газов их охлаждают и сжимают до параметров, соответствующих жидкой фазе, которые в общем случае отличаются от давления и температуры окружающей среды. Участок кривой  $AB$  представляет условия равновесия двух фаз — жидкости и пара (линия насыщенного пара). Тройная точка  $A$  фиксирует одновременное равновесие трех фаз. В критической точке  $B$  пропадает граница между жидкостью и паром: при  $T \geq T_{кр}$  вещество находится в газообразном состоянии, не-

зависимо от давления. Резкой границы между паром и газом провести нельзя. Поэтому оба эти состояния для краткости обозначаются как ГПВС. Критические параметры некоторых веществ приведены в табл. 1.

Сжиженные углеводородные газы, хлор, аммиак, фреоны, находящиеся под сверхатмосферным давлением при температуре выше или равной температуре окружающей среды в сосудах, резервуарах и другом технологическом оборудовании, являются перегретыми жидкостями.

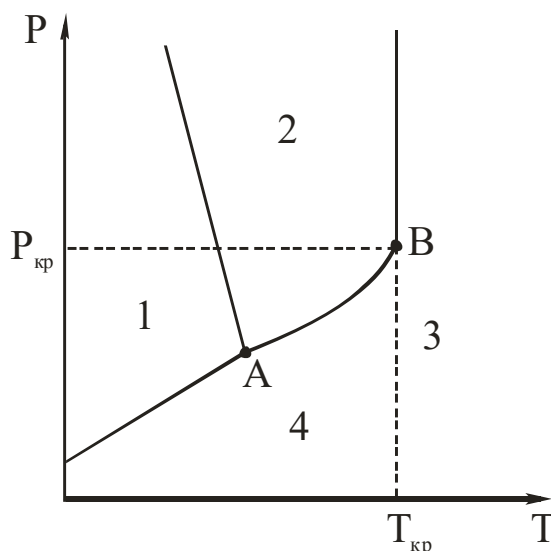


Рис.1 Диаграмма состояния вещества:

*A* - тройная точка; *B* - критическая точка; 1 - твердая фаза; 2 - жидкость; 3 - газ; 4 - пар

Таблица 1

Значения критических параметров и плотности  $\rho_{сж}$   
в сжиженном состоянии некоторых веществ

Вещество	$T$ кипения при давлении 0.1 МПа, °С	$T_{кр}$ , °С	$P_{кр}$ , МПа	$\rho_{сж}$ , кг/м <sup>3</sup>
Водород Н <sub>2</sub>	-252.0	-240.0	1.28	
Азот N <sub>2</sub>	-196.0	-147.0	3.40	
Кислород O <sub>2</sub>	-183.0	-118.0	5.05	
Метан CH <sub>4</sub>	-164.0	-82.0	4.65	

Вещество	$T$ кипения при давлении 0.1 МПа, °С	$T_{кр}$ , °С	$P_{кр}$ , МПа	$\rho_{сж}$ , кг/м <sup>3</sup>
Этилен С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub>	-103.7	9.5	5.02	567
Этан С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	-88.6	32.1	4.83	546
Пропилен С <sub>3</sub> Н <sub>6</sub>	-47.7	91.4	4.55	608
Пропан С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	-42.17	96.8	4.21	582
Хлор С1	-34.5	144.0	7.70	
Аммиак СН <sub>3</sub>	-33.35	132.4	11.30	682
Бутан С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	-0.6	153.0	3.70	601
Циклогексан С <sub>6</sub> Н <sub>12</sub>	+80.7	280.0	4.01	
Изобутан (СН <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> СН	-11.7	133.7		580
Пентан С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub>	+36.0	197.0		626
Двуокись углерода СО <sub>2</sub>	-78.52	31.0		1180
Тетрафторметан СF <sub>4</sub>	-128.0	-45.5		1960
Вода Н <sub>2</sub> О	+100.0	374.0	21.8	1000

В теплоизолированных ("изотермических") сосудах и резервуарах при отрицательных температурах хранят сжиженные газы (метан, азот, кислород), которые называют криогенными веществами. Критическая температура таких веществ значительно ниже, чем окружающей атмосферы.

Вещества другой характерной группы (пропан, бутан, аммиак, хлор) хранят в жидком состоянии под давлением в однослойных сосудах и резервуарах при температуре окружающей среды.

В. Маршал классифицировал вещества по признаку их расположения в зонах диаграммы состояния. К первой категории отнесены вещества с критической температурой ниже температуры среды (криогенные вещества – сжиженный природный газ (СПГ), содержащий, в основном, метан, азот, кислород).

Ко второй категории отнесены вещества с критической температурой выше, а точкой кипения ниже, чем в окружающей среде (сжиженный нефтяной газ (СНГ), пропан, бутан, аммиак, хлор). Их особенностью является "мгновенное" (очень быстрое) испарение части жидкости при разгерметизации и охлаждение оставшейся доли до точки кипения при атмосферном давлении.



Третью категорию составляют жидкости, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды (вещества, находящиеся в обычных условиях в жидком состоянии). Сюда попадают также некоторые вещества предыдущей категории, например, бутан – в холодную погоду и этиленоксид – в жаркую.

Четвертая категория – вещества, содержащиеся при повышенных температурах (водяной пар в котлах, циклогексан и другие жидкости под давлением и при температуре, превышающей их точку кипения при атмосферном давлении).

При разлиии жидкостей 3-й категории их испарение зависит от свойства летучести, температуры внешней среды и скорости ветра. На рис. 2 приведена ориентировочная зависимость скорости испарения  $v_{\text{исп}}$  разлиия от скорости ветра.

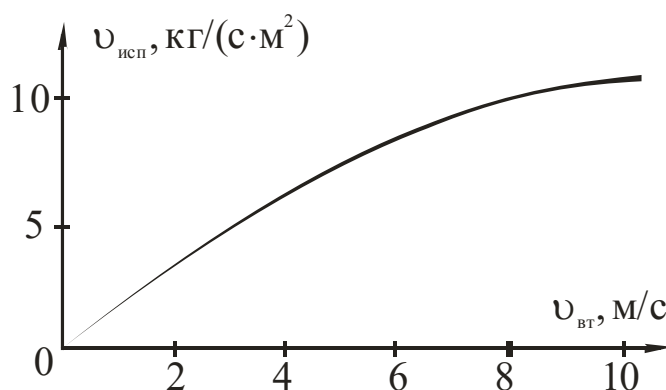


Рис. 2. Зависимость скорости испарения разлиия жидкостей третьей категории от скорости ветра

При полном разрушении емкостей с криогенными жидкостями, веществами второй категории происходит их выброс в атмосферу, вскипание с быстрым испарением и образованием облаков газопаро-воздушных смесей.

Аварийное вскрытие емкостей с негорючими или горючими перегретыми жидкостями сопровождается взрывом и опасным действием осколков.

Воспламенение облака ГПВС происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлагра-

ционного режима (режим быстрого сгорания) с ускоряющимся пламенем к детонационному сверхзвуковому.

Огненный шар без детонации возникает обычно при горении ГПВС, переобогащенной топливом, а также в некоторых случаях – состава, близкого стехиометрическому.

Переходу к детонации способствуют различные препятствия (строения, предметы, пересеченная местность) на пути распространения пламени, вызывающие турбулилизацию.

## 2. Условия детонации ГПВС

Сферическая детонационная волна может возникнуть и непосредственно в ГПВС от слабого энергетического источника, например, от искры, если размер облака превышает некоторое критическое значение (табл. 2) и в пределах концентраций, указанных в табл. 3.

Таблица 2

Минимальная энергия  $E_{min}$  инициирования ГПВС, наиболее чувствительных к детонации (смесей с объемной концентрацией  $\mu$  топлива) и минимальные диаметры  $d_{min}$  облака, способного детонировать

Горючий компонент	$\mu$ , об.%	$E_{min}$ , Дж	$d_{min}$ , м
Ацетилен $C_2H_2$	12.5	$1.3 \cdot 10^2$	3.12
Водород $H_2$	29.6	$4.2 \cdot 10^6$	109.6
Пропан $C_3H_8$	5.7	$2.5 \cdot 10^6$	85.8
Пропилен $C_3H_6$	6.6	$7.6 \cdot 10^5$	58.5
Этан $C_2H_6$	5.7	$5.1 \cdot 10^6$	109.6
Этилен $C_2H_4$	9.5	$1.2 \cdot 10^5$	31.2
Метан $CH_4$	12.3	$2.3 \cdot 10^8$	398.0

Статистика 150 аварий в России и странах СНГ в период 1970-1989 гг. показывает, что в 42.5% случаев взрывов облаков ГПВС участвовали углеводородные газы, 15.5% – пары легковоспламеняющихся жидкостей, 18.0% – водород, 5.3% – пыль органических продуктов. Аварийные взрывы конденсированных неста-

бильных веществ составили 12.0%. В 30 случаях при авариях из указанного числа происходили выбросы значительных масс токсичных веществ: хлора – 17, аммиака – 11, оксидов углерода и азота – 2.

Из 150 крупных взрывов 84 произошло в технологической аппаратуре, 66 – в атмосфере. В 73 случаях при взрывах были серьезные разрушения зданий, сооружений и различного оборудования промышленных предприятий.

Таблица 3

Концентрационные (об.%) пределы детонации и воспламенения ГПВС в неограниченном пространстве и в замкнутых объемах

Горючий компонент	Детонация				Воспламенение	
	неогр. простр.		замкн. объем			
	нижн.	верхн.	нижн.	верхн.	нижн.	верхн.
Ацетилен $C_2H_2$			4.2	50.0	2.5	80.0
Бутан $C_4H_{10}$	2.5	5.2	1.98	6.18	1.8	8.4
Водород $H_2$			18.3	58.9	4.0	75.0
Пропан $C_3H_8$	3.0	7.0	2.57	7.37	2.1	9.5
Пропилен $C_3H_6$	3.5	8.5	3.55	10.40	2.4	11.0
Этан $C_2H_6$	4.0	9.2	2.87	12.2	3.0	12.4
Этилен $C_2H_4$			3.32	14.7	2.7	36.0
Бензол $C_6H_6$			1.6	5.55	1.3	7.9
Ксилол $C_6H_{10}$					1.1	6.4
Циклогексан $C_6H_{12}$					0.57	7.8
*Метан $CH_4$					5.0	15.0
*Аммиак $NH_3$					15.5	27.0
*Окись углерода $CO$					12.5	74.2
*Сероводород $H_2S$					4.3	45.5

Аналогичные данные характеризуют аварийность, связанную со взрывами в Великобритании. Так, из общего числа аварий с выбросами и образованием облаков ГПВС в 40% случаев облака состояли из углеводородов с 3 или 4 атомами углерода. Пропан, бутан и их смеси, а также сжиженный нефтяной газ участвовали в авариях в три раза чаще, чем пары бензина. С учетом объемов выработки этих про-

дуктов промышленностью получается, что вероятность аварий, связанных с углеводородами, примерно в 30 раз больше, чем с бензином (в расчете на тонну продукта).

Что же касается метана, широко используемого в промышленности, то считается установленным, что этот продукт в неограниченном пространстве взрывается весьма редко, поскольку он не образует стабильных облаков вблизи поверхности земли. Его детонация возможна в ограниченных объемах в результате разлития и воспламенения, а также при инициировании взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Детонация смеси водорода с воздухом происходит при инициировании взрывом всего одного грамма тротила, что меньше, чем требуется для инициирования углеводородов, включая метан.

### 3. Методика расчета параметров детонационной волны

Детонационную волну в газах представляют как ударную волну, сопровождаемую волной горения. В отличие от дефлаграционного, данный процесс связан с разогревом газа ударной волной до температуры, обеспечивающей высокую скорость реакции и скорость распространения пламени со скоростью ударной волны.

Учитывая высокую скорость детонации (тысячи метров в секунду), сформировавшееся при быстром испарении облако ГПВС в целях расчета считают неизменным за весь период распространения фронта волны до внешней границы облака, схематизируемого полусферой радиуса  $r_0$  с центром на поверхности грунта (рис.3), совмещенным с источником инициирования. Давление на фронте детонационной волны в газовых смесях может достигать 2 МПа, а при взаимодействии с конструкциями в помещениях вследствие многократных отражений – доходить до 10 МПа.

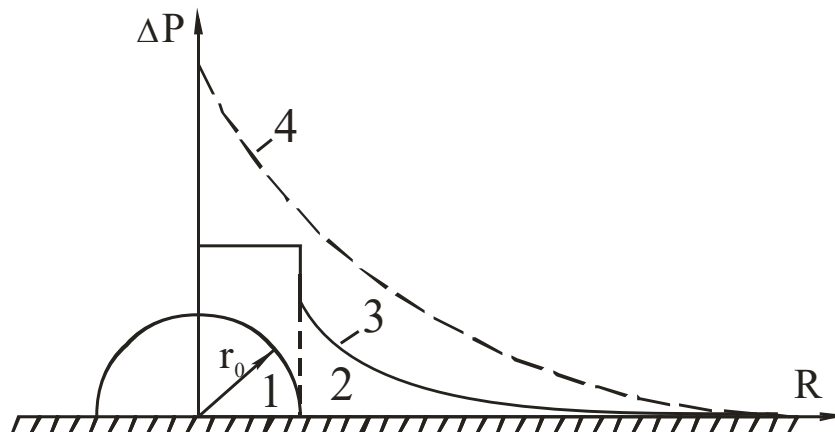


Рис. 3. Схема взрыва ГПВС и изменения давлений  $\Delta P$  по координате  $R$ :

1 - область облака ГПВС с радиусом  $r_0$ ; 2 - зона разлета ПД и воздушной ударной волны ( $R > r_0$ ); 3 - изменение давлений для взрыва ГПВС; 4 - изменение давлений для взрыва заряда конденсированного ВВ.

Параметры детонационной волны в процессе распространения в пределах облака существенно не меняются. При выходе за пределы границы облака расширяющиеся продукты детонации (ПД) возбуждают воздушную ударную волну.

Поскольку при выбросах не все количество жидкого продукта переходит в облако, к расчетному значению массы продукта вводят коэффициент  $\nu \leq 1$ . На рис. 3 схематически показано изменение максимума давления по координате  $R$  при взрыве ГПВС в сравнении со взрывом заряда конденсированного ВВ.

Для расчета поражающего действия взрывов ГПВС определяют параметры детонационной волны расширяющихся ПД и воздушной ударной волны.

Начальный радиус  $r_0$ , м, полусферического облака ГПВС в зависимости от его объема  $V_0$ , м<sup>3</sup>, определяют по формуле

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_0}{2\pi}}. \quad (1)$$

Поскольку согласно закону Авогадро киломоль  $\mu_T$  идеального газа занимает объем  $V_a = 22.4$  м<sup>3</sup>, для газовой смеси стехиометрического состава с объемной концентрацией  $C_{\text{стх}}$  и молекулярной мас-

сой  $\mu_r$  горючей компоненты массы  $C_B$  приближенная формула для объема облака записывается следующим образом:

$$V_0 = \frac{C_B V_a \mathcal{Q}}{\mu_r C_{\text{СТХ}}}. \quad (2)$$

Значение коэффициента  $\mathcal{Q}$  принимают в зависимости от способа хранения продукта:  $\mathcal{Q} = 1$  – для газов при атмосферном давлении;  $0.5$  – для газов, сжиженных под давлением;  $0.1$  – для газов, сжиженных охлаждением;  $0.02 \dots 0.07$  – при растекании легко воспламеняющихся жидкостей.

При взрыве детонационная волна распространяется со скоростью  $D$ , м/с,

$$D = \sqrt{2(\gamma_{\text{СТХ}}^2 - 1)Q_m}, \quad (3)$$

Здесь и далее  $Q_m$  – теплота взрыва единицы массы смеси, Дж/кг;  $\gamma_{\text{СТХ}}$  – показатель адиабаты продуктов детонации;  $\rho_{\text{СТХ}}$  – плотность облака ГПВС, кг/м<sup>3</sup>.

Время полной детонации облака  $t_B$ , с, равно

$$t_B = r_0 / D. \quad (4)$$

Максимум избыточного давления на фронте детонационной волны (химический пик)

$$\Delta P_1 = 4(\gamma_{\text{СТХ}} - 1)Q_m \rho_{\text{СТХ}} - P_0.$$

Через весьма малый интервал времени  $\tau$  избыточное давление в детонационной волне уменьшается в два раза (так называемая точка Жуге)

$$\Delta P_2 = \frac{\rho_{\text{СТХ}} D^2}{\gamma_{\text{СТХ}} + 1} - P_0. \quad (5)$$

Время  $\tau$  порядка десятков микросекунд и определяется длительностью превращений в зоне химической реакции, т.е. перехода от адиабаты исходного вещества к адиабате продуктов детонации.

Характеристики распространенных газо- и паровоздушных смесей приведены в таблице 4.

Характеристики газопаровоздушных смесей

Горючий компонент	$\rho_{\text{СТХ}}, \text{ кг/м}^3$	$Q_m,$ <i>МДж/кг</i>	$\gamma_{\text{СТХ}}$	$\mu_T$	$C_{\text{СТХ}}, \text{ об.}\%$
Газовоздушные смеси					
Аммиак $\text{NH}_3$	1.180	2.370	1.248	17	19.72
Ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$	1.278	3.387	1.259	26	7.75
Бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$	1.328	2.776	1.270	58	3.13
Бутилен $\text{C}_4\text{H}_8$	1.329	2.892	1.260	56	3.38
Винилхлорид $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	1.400	2.483	1.260	63	7.75
Водород $\text{H}_2$	0.933	3.425	1.248	2	29.59
Дивинил $\text{C}_4\text{H}_6$	1.330	2.962	1.260	54	3.68
Метан $\text{CH}_4$	1.232	2.763	1.256	16	9.45
Окись углерода $\text{CO}$	1.280	2.930	1.256	28	29.59
Пропан $\text{C}_3\text{H}_8$	1.315	2.801	1.257	44	4.03
Пропилен $\text{C}_3\text{H}_6$	1.314	2.922	1.259	42	4.46
Этан $\text{C}_2\text{H}_6$	1.250	2.797	1.257	30	5.66
Этилен $\text{C}_2\text{H}_4$	1.285	3.010	1.259	28	6.54
Паровоздушные смеси					
Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	1.210	3.112	1.259	42	4.99
Бензин авиационный	1.350	2.973	—	94	2.10
Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$	1.350	2.937	1.261	78	2.84
Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$	1.340	2.797	1.261	86	2.16
Дихлорэтан $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1.490	2.164	1.265	99	6.54
Диаэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	1.360	2.840	1.261	74	3.38
Ксилол $\text{C}_6\text{H}_{10}$	1.355	2.830	1.259	106	1.96
Метанол $\text{CH}_4\text{O}$	1.300	2.843	1.253	32	12.30
Пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	1.340	2.797	1.258	72	2.56
Толуол $\text{C}_7\text{H}_8$	1.350	2.843	1.260	92	2.23
Циклогексан $\text{C}_6\text{H}_{12}$	1.340	2.797	1.248	84	2.28
Этанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1.340	2.804	1.256	46	6.54

На расстоянии  $R, м$ , до центра взрыва, превышающем начальный размер облака ( $R > r_0$ ) такие параметры ударной волны как максимум эффективного избыточного давления  $\Delta P, Па$ , и удельный импульс  $I, Па \cdot с$ , определяются по формулам:

$$\Delta P_m = P_0 \bar{P}, \quad (6)$$

$$\lg \bar{P} = 0.65 - 2.18 \lg \bar{R} + 0.52 (\lg \bar{R})^2, \quad \bar{R} = R / \sqrt[3]{m_T}, \quad (7)$$

$$I = \bar{I} \sqrt[3]{m_T}, \quad (8)$$

$$\lg \bar{I} = 2.11 - 0.97 \lg \bar{R} + 0.44 (\lg \bar{R})^2. \quad (9)$$

Здесь  $m_T$  – тротильный эквивалент наземного взрыва полусферического облака ГПВС, кг,

$$m_T = 2mQ_m / Q_T, \quad (10)$$

$m = \rho_{\text{стх}} V_0$  – масса горючего облака, кг;  $Q_T$  – теплота взрыва тротила (принята равной  $4.184 \cdot 10^6$  Дж/кг);  $P_0$  – атмосферное давление, Па.

Для сшивания параметров на границе облака величина  $r_0$  заменяется на близкое значение  $R_0$ , определяемое из условия непрерывности функции  $\Delta P_m(R)$  в точке  $R=R_0$ :

$$R_0 = 10^\alpha \sqrt[3]{m_T}, \quad \alpha = K_1 - \sqrt{K_1^2 - A},$$

$$K_1 = 1.09/0.52, \quad A = 1.25 - \frac{\lg(\Delta P_2/P_0)}{0.52}. \quad (11)$$

Это означает, что при расстояниях  $R \leq R_0$  значение избыточного давления принимается постоянным и равным  $\Delta P_m(R_0)$ , а значение импульса принимается равным  $I(R_0)$  из (8).

Эффективное время  $\Theta, с$ , действия фазы сжатия ударной волны определяется по формуле

$$\Theta = 2I / \Delta P_m. \quad (12)$$

#### 4. Пример расчета параметров детонационной волны

Рассчитаем параметры взрыва облака ГПВС, образованного при разрушении резервуара с 1000 т сжиженного пропана.



Исходные данные:

$$C_B = 10^6 \text{ кг}; \quad \mathcal{G} = 0.5; \quad C_{\text{CTX}} = 4.03 \%; \quad Q_m = 2.801 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$\mu_r = 44; \quad \gamma_{\text{CTX}} = 1.257; \quad \rho_{\text{CTX}} = 1.315 \text{ кг/м}^3; \quad P_0 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Определяем объем ГПВС по формуле (2)

$$V_0 = 22.4 \cdot 0.5 \cdot 10^6 / (44 \cdot 0.0403) = 6.316 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Параметры детонационной волны

$$D = \sqrt{2(1.257^2 - 1) \cdot 2.801 \cdot 10^6} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ м/с},$$

$$\Delta P_2 = \frac{1.315 \cdot (1.8 \cdot 10^3)^2}{1.257 + 1} - 1.013 \cdot 10^5 = 17.9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Параметры ударной волны при  $R > r_0$  определим по формулам (6)...(12):

масса газового облака

$$m = 1.315 \cdot 6.316 \cdot 10^6 = 8.31 \cdot 10^6 \text{ кг},$$

$$m_r = 2 \cdot 8.31 \cdot 10^6 \cdot 2.801 \cdot 10^6 / 4.184 \cdot 10^6 = 1.11 \cdot 10^7 \text{ кг};$$

уточненное значение радиуса облака

$$A = 1.25 - \frac{\lg(17.9 \cdot 10^5 / 1.013 \cdot 10^5)}{0.52} = -1.149,$$

$$K_1 = 2.096, \quad \alpha = 2.096 - \sqrt{2.096^2 + 1.149} = -0.258,$$

$$R_0 = 10^{-0.258} \cdot \sqrt[3]{1.11 \cdot 10^7} = 123 \text{ м},$$

$$\bar{R}_0 = 123 / \sqrt[3]{1.11 \cdot 10^7} = 0.551 \text{ м/кг}^{1/3};$$

удельный импульс на расстоянии  $R_0$ :

$$\lg \bar{I}_0 = 2.11 - 0.97 \lg 0.551 + 0.44(\lg 0.551)^2 = 2.364,$$

$$\bar{I}_0 = 10^{2.364} = 231 \text{ Па} \cdot \text{с/кг}^{1/3},$$

$$I_0 = 231 \cdot \sqrt[3]{1.11 \cdot 10^7} = 5.15 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

эффективное время фазы сжатия

$$\Theta_0 = 2 \cdot 5.15 \cdot 10^4 / 17.9 \cdot 10^5 = 0.0575 \text{ с}.$$

Определим параметры ударной волны на расстоянии  $R=200 \text{ м}$  от центра взрыва ( $R > R_0$ ):

$$\bar{R} = 200 / \sqrt[3]{1.11 \cdot 10^7} = 0.897 \text{ м/кг}^{1/3},$$

$$\lg \bar{P} = 0.65 - 2.18 \lg 0.897 + 0.52(\lg 0.897)^2 = 0.754,$$

$$\bar{P} = 10^{0.754} = 5.675,$$

$$\Delta P_m = 1.013 \cdot 10^5 \cdot 5.675 = 5.76 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$\lg \bar{I} = 2.11 - 0.97 \lg 0.897 + 0.44 (\lg 0.897)^2 = 2.156,$$

$$\bar{I} = 10^{2.156} = 143.2 \text{ Па} \cdot \text{с} / \kappa \text{з}^{1/3},$$

$$I_0 = 143.2 \cdot \sqrt[3]{1.11 \cdot 10^7} = 3.19 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$\Theta_0 = 2 \cdot 3.19 \cdot 10^4 / 5.76 \cdot 10^5 = 0.11 \text{ с}.$$

Зависимости  $\Delta P_m(R)$  и  $I(R)$  приведены на рис. 4.

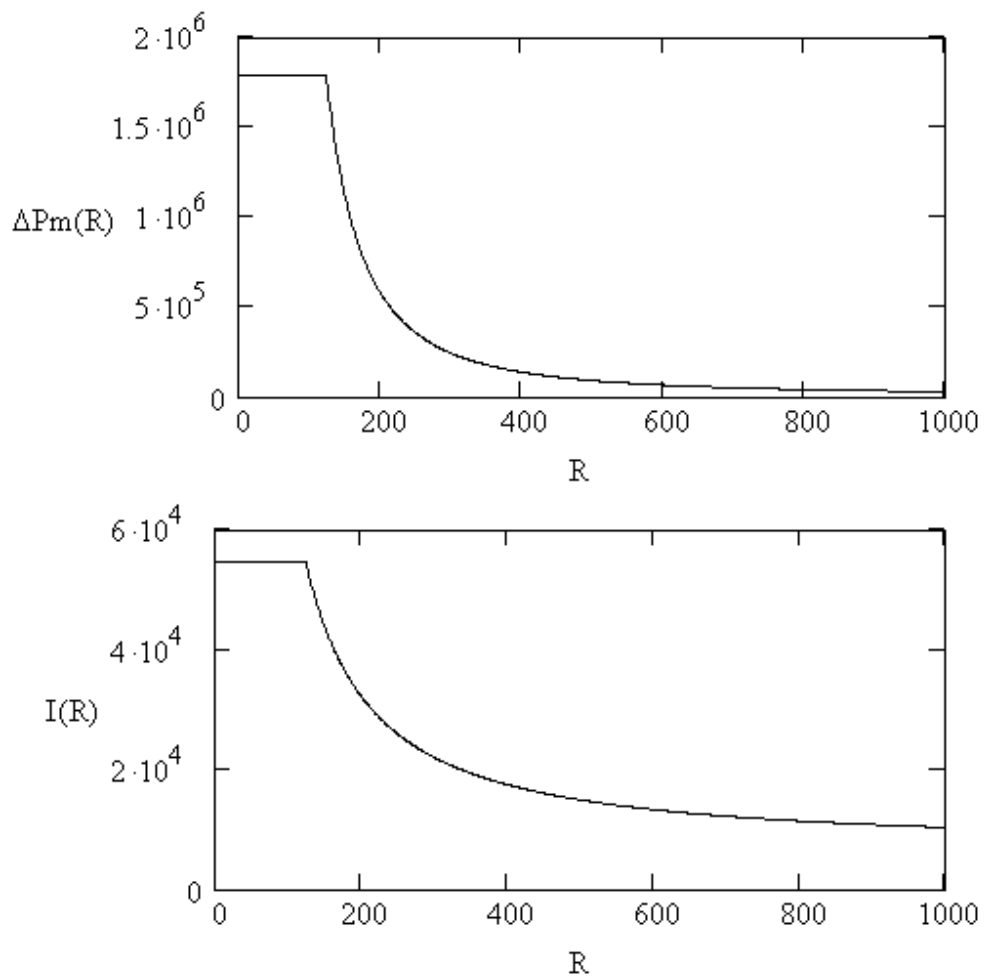


Рис. 4. Зависимости  $\Delta P_m(R)$  и  $I(R)$  к расчету взрыва пропано-воздушного облака при разливе 1000 т сжиженного пропана

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для заданного преподавателем состава ГПВС массой 1000 т рассчитать параметры детонационной волны и оценить степень поражения населения. Для этого:

1. Составить на ЭВМ в среде GАР программу по расчету параметров взрыва.
2. Построить графики зависимостей параметров ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва ( $R=10...1000$  м).
3. Оценить риск поражения населения, находящегося в районе взрыва. Для этого, используя данные табл. 2, приведенные в методических указаниях к лабораторной работе "Расчет параметров взрывов конденсированных взрывчатых веществ", рассчитать на местности границы характерных зон поражения, и, далее, площади зон. При определении количества попавших в область взрыва людей плотность населения принять равной 1 человек на  $100$  м<sup>2</sup>.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Листинг написанной в среде GАР программы расчета параметров взрыва ГПВС.
4. Графики зависимостей параметров ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва.
5. Таблица с результатами расчета людских потерь по зонам поражения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких агрегатных состояниях могут находиться компоненты ГПВС?
2. Какова классификация веществ по признаку их расположения в зонах диаграммы состояния?

3. Объясните, в каких условиях происходит воспламенение облака ГПВС, а в каких – детонация.
4. Исходя из каких допущений, формируется математическая модель взрыва ГПВС?
5. В чем состоит отличие зависимостей избыточного давления от расстояния при взрыве конденсированного ВВ и облака ГПВС?

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



## **РАСЧЕТ ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ОСКОЛКОВ ПРИ ВЗРЫВАХ ГАЗО- И ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ЕМКОСТЯХ**

методические указания

к проведению практической работы по дисциплине  
«Управление рисками, системный анализ и моделирование»  
для студентов направления подготовки  
20.04.01 Техносферная безопасность

Курск 2021

УДК 371.64/.69:004

Составители: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.П. Тимофеев.*

**Расчет поражающего действия осколков при взрывах газо- и паровоздушных смесей в емкостях:** методические указания к проведению практической работы по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова. Курск, 2021. 17 с.

В методических указаниях излагается методика расчета поражающего действия осколочного поля, возникающего при аварийном разрушении различных емкостей с энергоносителями, безотносительно к характеру дробления оболочек и зависимости баллистики от параметров осколков.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,04. Уч.-изд.л. 1. Тираж 30 экз. Заказ     . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- изучение методики расчета поражающего действия осколков при взрывах газо- и паровоздушных смесей (ГПВС) в емкостях;
- создание на ЭВМ в среде GАР программ по оценке действия спектра осколков на объекты.

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

При аварийном разрушении оболочек резервуаров, газгольдеров и сосудов давления со сжатым взрывоопасным или инертным газом (газовыми смесями) образуются осколки, способные наносить материальный ущерб и вызывать поражение людей.

Анализ последствий взрывов ГПВС проводят в два этапа. На первом рассчитывают параметры взрыва емкости с энергоносителем, на втором, – исходя из полученной начальной скорости осколков, – оценивают поражающее действие осколков на объекты-мишени.

## 1. Расчет параметров взрыва емкости с энергоносителем

Тепло  $Q_B$ , Дж/кг, выделяющееся при взрывном превращении и расширении единицы массы энергоносителя, определяют из выражения

$$Q_B = Q_m + \Delta Q. \quad (1)$$

Здесь  $Q_m$  – теплота взрыва единицы массы смеси, Дж/кг;  $\Delta Q$  – удельная энергия газа (смеси газов), сжатого избыточным давлением  $\Delta P = P - P_0$  ( $P$  – давление в емкости, Па;  $P_0 = 101325$  Па – атмосферное давление). Параметры некоторых ГПВС при нормальных условиях даны в табл. 1, 2, где  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $\rho_0$  – плотность ГПВС, кг/м<sup>3</sup>. Отметим, что для инертных газов величина  $Q_m$  принимается равной нулю.

## Характеристики инертных газов при нормальных условиях

Газ	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$	$\gamma$
Воздух	1.225	1.40
Двуокись углерода $\text{CO}_2$	1.872	1.28
Гелий He	0.170	1.67
Водород H	0.0853	1.40
Кислород $\text{O}_2$	1.352	1.40
Азот N	1.181	1.40
Двуокись серы $\text{SO}_2$	2.768	1.26
Насыщенный водяной пар	0.763	1.28

Таблица 2

## Характеристики взрывоопасных ГПВС при нормальных условиях

Горючий компонент	$\rho_0, \text{ кг/м}^3$	$Q_m, \text{ МДж/кг}$	
Газовоздушные смеси			
Аммиак $\text{NH}_3$	1.180	2.370	.248
Ацетилен $\text{C}_2\text{H}_2$	1.278	3.387	.259
Бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$	1.328	2.776	.270
Бутилен $\text{C}_4\text{H}_8$	1.329	2.892	.260
Винилхлорид $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	1.400	2.483	.260
Водород $\text{H}_2$	0.933	3.425	.248
Дивинил $\text{C}_4\text{H}_6$	1.330	2.962	.260
Метан $\text{CH}_4$	1.232	2.763	.256



Горючий компонент	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_m$ , МДж/кг	
Окись углерода CO	1.280	2.930	.256
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.315	2.801	.257
Пропилен C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1.314	2.922	.259
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.250	2.797	.257
Этилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.285	3.010	.259
Паровоздушные смеси			
Ацетон C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	1.210	3.112	.259
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1.350	2.937	.261
Гексан C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1.340	2.797	.261
Дихлорэтан C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	1.490	2.164	.265
Диэтиловый эфир C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	1.360	2.840	.261
Ксилол C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	1.355	2.830	.259
Метанол CH <sub>4</sub> O	1.300	2.843	.253
Пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1.340	2.797	.258
Толуол C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	1.350	2.843	.260
Циклогексан C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1.340	2.797	.248
Этанол C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	1.340	2.804	.256

Удельную энергию газа  $\Delta Q$ , Дж/кг, сжатого избыточным давлением  $\Delta P$ , получают по формуле

$$\Delta Q = \frac{\Delta P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность смеси при давлении  $P$ , кг/м<sup>3</sup>, – рассчитывается как

$$\rho = \rho_0 \cdot \sqrt[\gamma]{P/P_0}. \quad (3)$$

Оценить начальную скорость осколков разрушаемой оболочки  $V_0$ , м/с, можно из выражения

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot Q_B}. \quad (4)$$

Здесь  $\beta = C/m$  – отношение масс энергоносителя и оболочки. Масса  $C$ , кг, энергоносителя с плотностью  $\rho$ , находящегося в сосуде с объемом  $V$ , м<sup>3</sup>, равна

$$C = \rho \cdot V. \quad (5)$$

При взрывах газовых смесей (табл. 2) для продуктов детонации малой плотности определяют скорость детонации  $D$ , м/с,

$$D = \sqrt{2 \cdot (\gamma^2 - 1) \cdot Q_B}, \quad (6)$$

и массовую скорость продуктов детонации

$$V_{\text{пл}} = \frac{D}{\gamma + 1}. \quad (7)$$

Так как скорость  $V_0$  не может превышать значения массовой скорости  $V_{\text{пл}}$ , вводят следующее ограничение

$$V_0 = \begin{cases} V_0, & \beta < \beta_* \\ V_{\text{пл}}, & \beta \geq \beta_* \end{cases},$$

$$\beta_* = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}.$$

Тротильный эквивалент взрыва ГПВС оценивают по формуле

$$C_{\text{ТНТ}} = 2 \cdot \eta \cdot \frac{Q_B}{Q_{\text{ТНТ}}} \cdot C, \quad \text{кг}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{ТНТ}} = 4.24$  МДж/кг – теплота взрыва тротила. Коэффициент  $\eta < 1$  учитывает расход энергии на образование воронки в грунте

для наземных взрывов (для средних грунтов  $\eta = 0.6 \dots 0.65$ , для плотных суглинков и глины  $\eta = 0.8$ ).

Избыточное давление  $\Delta P_\phi$ , МПа, на фронте ударной волны и удельный импульс  $I$ , кПа·с, на расстоянии  $R$ , м, определяют из выражений:

$$\Delta P_\phi = \frac{0.084}{\bar{R}} + \frac{0.27}{\bar{R}^2} + \frac{0.7}{\bar{R}^3}, \quad \bar{R} = R/\sqrt[3]{C_{\text{ТНТ}}}; \quad (9)$$

$$I = 0.4 \cdot \sqrt[3]{C_{\text{ТНТ}}^2} / R.$$

## 2. Поражающее действие осколков

В момент удара осколка по объекту-мишени скорость встречи на расстоянии  $R$  будет меньше, чем начальная скорость  $V_0$ , по причине торможения лобовым сопротивлением воздуха. Для определения изменений скорости осколка с расстоянием используется приближенная формула Г. И. Покровского

$$V = V_0 \cdot \exp\left(-\frac{R}{\omega \cdot l}\right), \quad (10)$$

где  $V$  – скорость удара, м/с;  $l = \sqrt{d_1^2 + l_1^2}$  – характерный размер осколка, определяемый его толщиной  $l_1$  и диаметром  $d_1$ , м;  $\omega = \rho_1/\rho_a$  – отношение плотностей материала оболочки и воздуха.

Приведенная формула ограничена величиной  $R_*$ , м, дальности полета осколка

$$R_* \approx 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{H/g}, \quad R < R_*, \quad (11)$$

где  $H$  – высота центра взрыва, м;  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Оценку поражающего действия осколка по объекту будем проводить с учетом только размеров и массы осколка, безотносительно к характеру дробления оболочек и зависимости баллистики от параметров осколков. В этом случае толщина осколка  $l_1$  при расчетах принимается равной толщине  $d$  материала оболочки, а диаметр  $d_1$  – кратным толщине  $d$  ( $d_1 = z \cdot d$ ,  $z = 1, 2, \dots$ ). Тогда масса осколка  $m_0$ , кг, определяется по формуле

$$m_0 = d \cdot A \cdot \rho_1, \quad A = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}, \quad (12)$$

где  $A$  – миделево сечение осколка,  $m^2$ . Число  $n$  осколков с сечением  $A$  определяется через отношение площади поверхности оболочки  $S$  к площади поперечного сечения осколка, т.е.  $n = S/A$ .

Скорость удара, при которой преграда толщиной  $h_*$  пробивается с полной потерей кинетической энергии, называется предельной баллистической или критической скоростью. Если скорость удара превысит критическое значение, осколок проколет преграду толщиной  $h_2 < h_*$ , потеряв лишь часть кинетической энергии.

При высокоскоростном ударе принято считать, что сопротивление внедрению в металлическую преграду достаточно постоянно, обуславливая линейное убывание скорости осколка до полного его торможения в преграде толщиной  $h_*$ . Тогда порядок остаточной скорости  $V_\wedge$  для преграды толщиной  $h_2 < h_*$  можно оценить по формуле

$$V_\wedge = V \cdot \left( 1 - \frac{h_2}{h_*} \right). \quad (13)$$

Предельная толщина металлической преграды  $h_*$ ,  $m$ , пробиваемой осколком с 50% вероятностью, определяется из выражения

$$h_* = \frac{0.138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}. \quad (14)$$

Здесь  $\sigma_2$  и  $\rho_2$  – динамический предел текучести,  $Па$ , и плотность материала преграды,  $кг/м^3$ . Значения  $\sigma$  и  $\rho$  для некоторых металлов приведены ниже.

Металл	Динамический предел текучести $\sigma$ , $ГПа$	Плотность $\rho$ , $кг/м^3$
Стали	0.30...2.10	7800
Чугуны	0.12...0.40	7100
Магниеые сплавы	0.21...0.34	1800
Алюминиевые сплавы	0.44...0.55	2780
Титановые сплавы	0.45...1.50	4500

Поражающее действие осколка на человека, с 50% вероятностью вызывающее сильные ранения, оценивают по предельной скорости удара  $V_{50}$ , м/с, согласно эмпирической зависимости

$$V_{50} \cong \frac{1247 \cdot A}{m_0} + 22. \quad (15)$$

### 3. Примеры расчета взрывов энергоносителей в оболочках

**Пример 1.** Оценка параметров аварийного взрыва газгольдера со сжатым воздухом и действия осколков по мишеням из алюминиевого сплава.

В сферическом стальном газгольдере высокого давления объемом  $600 \text{ м}^3$  со сжатым воздухом, не имеющем средств сброса давления, в результате сверхнормативного поступления воздуха давление  $P = 2.961 \text{ МПа}$  значительно превысило расчетное рабочее давление ( $0.8 \text{ МПа}$ ), вследствие чего произошло взрывное разрушение оболочки.

Параметры оболочки: радиус  $r = 5.25 \text{ м}$ , толщина стенки  $d = 16 \text{ мм}$ . Газгольдер расположен на высоте  $H = 4 \text{ м}$ , грунт – средний ( $\eta = 0.6$ ).

Площадь поверхности газгольдера

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3.14 \cdot 5.25^2 = 346.361 \text{ м}^2.$$

Объем газгольдера

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot 5.25^3 = 606.131 \text{ м}^3.$$

Масса оболочки при плотности металла  $\rho_1 = 7800 \text{ кг/м}^3$  равна

$$m = S \cdot d \cdot \rho_1 = 346.361 \cdot 0.016 \cdot 7800 = 43.23 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

Плотность воздуха в газгольдере при избыточном давлении  $\Delta P = P - P_0 = 2.961 - 0.101 = 2.86 \text{ МПа}$  находится по уравнению изэнтропы (3)

$$\rho = \rho_0 \cdot \sqrt[\gamma]{P/P_0} = 1.225 \cdot \sqrt[1.4]{2.961/0.101} = 13.68 \text{ кг/м}^3.$$

Полная масса газа  $C = \rho \cdot V = 13.68 \cdot 606.131 = 8.292 \cdot 10^3 \text{ кг}$ . Отношение масс сжатого воздуха и металла оболочки

$$\beta = C/m = 8.292 \cdot 10^3 / 43.23 \cdot 10^3 = 0.192.$$

По формуле (2) подсчитываем удельную энергию газа

$$\Delta Q = \frac{\Delta P}{\rho \cdot (\gamma - 1)} = \frac{2.86 \cdot 10^6}{13.68 \cdot (1.4 - 1)} = 5.227 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг},$$

и, соответственно,  $Q_B = \Delta Q = 5.227 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ .

Начальная скорость осколков оболочки составит по формуле (4)

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot Q_B} = \sqrt{2 \cdot 0.192 \cdot 5.227 \cdot 10^5} = 447.796 \text{ м/с}.$$

Тротильный эквивалент взрыва газгольдера

$$C_{\text{ТНТ}} = 2 \cdot \eta \cdot \frac{Q_B}{Q_{\text{ТНТ}}} \cdot C = 2 \cdot 0.6 \cdot \frac{5.227 \cdot 10^5}{4.24 \cdot 10^6} \cdot 8.292 \cdot 10^3 = 1227 \text{ кг}.$$

Рассмотрим поражающее действие спектра осколков по преградам из дюралюминия Д16 с динамическим пределом текучести  $\sigma_2 = 440 \text{ МПа}$  на расстоянии  $R = 10 \text{ м}$  от оболочки. Для возможного дробления оболочки примем отношения диаметров осколков к толщине стенки оболочки  $z = d_1/d = 1, 2.5, 5, 10$ . Так, для первого значения  $d_1 = d$  получим

$$l = \sqrt{d_1^2 + l_1^2} = \sqrt{0.016^2 + 0.016^2} = 0.023 \text{ м};$$

$$\omega = 7800/1.225 = 6.367 \cdot 10^3.$$

Скорость встречи по формуле (10)

$$V = V_0 \cdot \exp\left(-\frac{R}{\omega \cdot l}\right) = 447.796 \cdot \exp\left(-\frac{10}{6.367 \cdot 10^3 \cdot 0.023}\right) = 417.77 \text{ м/с}$$

Дальность полета осколков по формуле (11) ориентировочно составит

$$R_* = 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{H/g} = 2 \cdot 447.796 \cdot \sqrt{4/9.81} = 571.881 \text{ м}.$$

Число осколков с миделем

$$A = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.016^2}{4} = 2.011 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

равно  $n = S/A = 346.361/2.011 \cdot 10^{-4} = 1.723 \cdot 10^6$ . Масса осколка

$$m_0 = d \cdot A \cdot \rho_1 = 0.016 \cdot 2.011 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 = 0.025 \text{ кг}.$$

Предельная толщина пробиваемой дюралюминиевой преграды с параметрами  $\rho_2 = 2780 \text{ кг/м}^3$  и  $\sigma_2 = 440 \text{ МПа}$  по формуле (14) составляет

$$h_* = \frac{0.138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}} = \frac{0.138 \cdot 0.016 \cdot 7800 \cdot 417.77}{\sqrt{440 \cdot 10^6 \cdot 2780}} = 6.506 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для пробиваемых мишеней толщиной  $h_2 < h_*$  определяется скорость осколка  $V_\Lambda$  на вылете из преграды. Например, для мишени с  $h_2 = 5 \text{ мм}$  по формуле (13)

$$V_\Lambda = V \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_*}\right) = 417.77 \cdot \left(1 - \frac{5 \cdot 10^{-3}}{6.506 \cdot 10^{-3}}\right) = 96.681 \text{ м/с.}$$

Для оценки поражения человека осколком вычисляется предельная скорость удара  $V_{50}$  согласно зависимости (15)

$$V_{50} = \frac{1247 \cdot 2.011 \cdot 10^{-4}}{0.025} + 22 = 31.992 \text{ м/с.}$$

В табл. 3 приведены результаты расчета действия спектра осколков газгольдера по дюралюминиевым мишеням различной толщины. Графики зависимостей предельной толщины преграды и остаточной скорости осколков при пробивании мишеней различной толщины от диаметра осколков показаны на рис.1, 2.

Таблица 3

Результаты расчета осколочного действия взрыва сферического разгольдера

Диаметр осколка $d_1, \text{ мм}$	Масса осколка $m_0, \text{ кг}$	Скорость встречи $V, \text{ м/с}$	Толщина мишени $h_2, \text{ мм}$	Остаточная скорость $V_\Lambda, \text{ м/с}$	Глубина проникания $h_*, \text{ мм}$
16	0.025	417.77	10	-	6.5
			10	174.895	
40	0.157	431.766	15	46.459	16.8
			20	-	
80	0.627	439.258	10	310.823	34.2
			15	246.605	
			20	182.387	
			25	118.170	
			30	53.952	
			35	-	
160	2.509	443.444	10	379.226	

		12		
		15	347.117	
		20	282.899	
		25	282.899	
		30	250.790	
		35	218.682	
		40	186.573	
		45	154.464	
		50	122.355	
		55	90.246	
		60	58.137	
		65	26.028	
		70	-	69.05

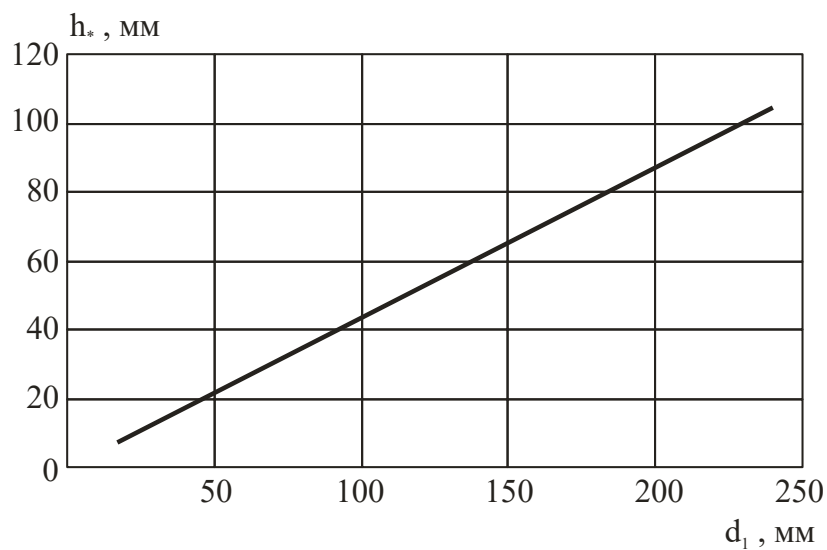


Рис. 1. Зависимость предельной толщины пробиваемой преграды



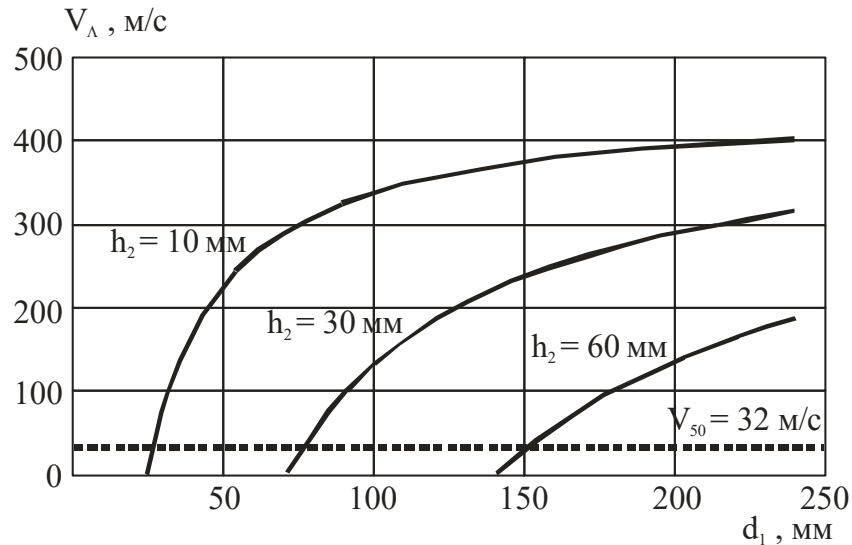


Рис. 2. Зависимости остаточной скорости осколков при пробитии мишеней различной толщины

**Пример 2.** Оценка параметров аварийного взрыва 8-осной железнодорожной цистерны (модель 15-1581).

Размеры цистерны: длина  $h = 23.4$  м, радиус  $r = 1.5$  м. Материал котла – сталь 09Г2С с пределом прочности  $\sigma_1 = 330$  МПа, толщина стенки  $d = 30$  мм. Котел содержит газоздушную смесь с горючей компонентой метаном. Взрыв произошел при давлении  $P = 3.101$  МПа, соответствующем пределу прочности металла. Высота эпицентра взрыва  $H = 3$  м, грунт – средний ( $\eta = 0.6$ ).

Анализируется действие осколков на мишени из высокопрочной стали с пределом прочности  $\sigma_2 = 2100$  МПа на расстоянии  $R = 100$  м.

Площадь поверхности цистерны

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot 3.14 \cdot 1.5^2 + 2 \cdot 3.14 \cdot 1.5 \cdot 23.4 = 234.677 \text{ м}^2.$$

Объем котла

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3.14 \cdot 1.5^2 \cdot 23.4 = 165.405 \text{ м}^3.$$

Масса оболочки при плотности металла  $\rho_1 = 7800$  кг/м<sup>3</sup> равна

$$m = S \cdot d \cdot \rho_1 = 234.677 \cdot 0.03 \cdot 7800 = 54.91 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

Плотность ГПВС в цистерне при избыточном давлении  $\Delta P = P - P_0 = 3.101 - 0.101 = 3$  МПа находим по уравнению изэнтропы

(3)

$$\rho = \rho_0 \cdot \sqrt[\gamma]{P/P_0} = 1.232 \cdot \sqrt[1.256]{3/0.101} = 18.822 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Полная масса смеси } C = \rho \cdot V = 18.822 \cdot 165.405 = 3.113 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

Отношение масс сжатой смеси и металла оболочки  $\beta = C/m = 3.113 \cdot 10^3 / 54.91 \cdot 10^3 = 0.057$ ;

$$\beta_* = (1.256 - 1) / (1.256 + 1) = 0.113.$$

По формулам (1) и (2) подсчитываем суммарную энергию взрывоопасного сжатого газа

$$Q_B = Q_m + \frac{\Delta P}{\rho \cdot (\gamma - 1)} = 2.763 \cdot 10^6 + \frac{3 \cdot 10^6}{18.822 \cdot (1.256 - 1)} = 3.386 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Начальная скорость осколков оболочки составит по формуле (4)

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot Q_B} = \sqrt{2 \cdot 0.057 \cdot 3.386 \cdot 10^6} = 619.583 \text{ м/с},$$

а скорость детонации  $D$

$$D = \sqrt{2 \cdot (\gamma^2 - 1) \cdot Q_B} = \sqrt{2 \cdot (1.256^2 - 1) \cdot 3.386 \cdot 10^6} = 1978 \text{ м/с}.$$

Полученная величина  $V_0$  не превышает значения массовой скорости продуктов детонации

$$V_{\text{пд}} = \frac{D}{\gamma + 1} = \frac{1978}{1.256 + 1} = 876.563 \text{ м/с} > 619.583 \text{ м/с}.$$

Тропиловый эквивалент взрыва цистерны с метаном

$$C_{\text{ТНТ}} = 2 \cdot \eta \cdot \frac{Q_B}{Q_{\text{ТНТ}}} \cdot C = 2 \cdot 0.6 \cdot \frac{3.386 \cdot 10^6}{4.24 \cdot 10^6} \cdot 3.113 \cdot 10^3 = 2983 \text{ кг}.$$

Результаты оценки действия спектра осколков цистерны по стальным мишеням различной толщины приведены в табл. 4. На рис. 3 показаны зависимости остаточной скорости осколков при пробивании мишеней.

Таблица 4

Результаты расчета осколочного действия взрыва цистерны

Диаметр осколка $d_1$ , мм	Масса осколка $m_0$ , кг	Скорость встречи $V$ , м/с	Толщина мишени $h_2$ , мм	Остаточная скорость $V_\Delta$ , м/с	Глубина проникания $h_*$ , мм
30	0.165	427.893	5	-	3.4
60	0.662	490.256	5	176.926	-

			15		
			10	-	7.8
150	4.135	559.128	5	433.796	
			10	308.464	
			15	183.132	
			20	57.8	
			25	-	22.3
300	16.54	588.135	5	525.469	
			10	462.803	
			15	400.137	
			20	337.471	
			25	274.805	
			30	212.139	
			35	149.473	
			40	86.807	
			45	24.141	
			50	-	46.9

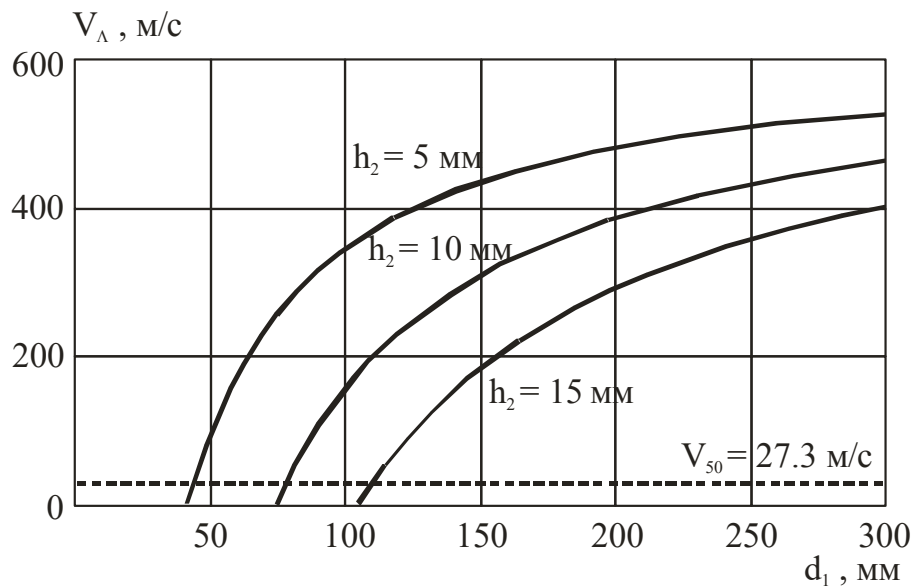


Рис. 3. Зависимости остаточной скорости осколков при пробивании мишеней различной толщины

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для заданного преподавателем варианта (табл. 5) рассчитать параметры взрыва стальной емкости с энергоносителем и оценить поражающее действие осколков на объекты-мишени (преграды из металла и человек). Для нечетных вариантов емкость с энергоносителем расположена на среднем грунте, для четных – на плотном суглинке.

Отношение диаметров осколков к толщине стенки оболочки  $z$  изменяется в диапазоне от 1 до 15. Действие осколков на металлические мишени анализируется на расстоянии  $R = 100 \text{ м}$ .

Таблица 5

Варианты заданий

Вариант	Размеры емкости ( $r$ или $h \times r$ ), м	$d$ , мм	Энергоноситель ( $\Delta P$ , МПа)	Мишень ( $\sigma_2$ , МПа)	$H$ , м
1	Сфера (3)	10	Воздух (3)	Сталь (300)	2
2	Цилиндр (20×2)	15	Бутан (0)	Магниевый сплав (300)	2.5
3	Сфера (4)	20	Пропан (0.05)	Алюмин. сплав (440)	3
4	Цилиндр (22×2)	25	Пар (4)	Чугун (400)	3.5
5	Сфера (5)	30	Бензол (0)	Титановый сплав (450)	4
6	Цилиндр (25×1.5)	10	Дихлорэтан (0.15)	Сталь (500)	2
7	Сфера (6)	15	Гелий (5)	Магниевый сплав (250)	2.5
8	Цилиндр (20×3)	20	Аммиак (0)	Алюмин. сплав (500)	3
9	Сфера (7)	25	Пропилен (0.2)	Чугун (150)	3.5
10	Цилиндр (20×2)	30	Азот (3)	Титановый сплав (1000)	4

Для этого:

1. Составить на ЭВМ в среде GАР программу по анализу последствий взрыва емкости с ГПВС.
2. Построить график зависимости предельной толщины пробиваемой металлической преграды от диаметра осколков.
3. Построить 3-х мерный график зависимости остаточной скорости от диаметра осколков и толщины преграды, а также несколько сечений полученной поверхности.
4. Определить на плоскости  $(d, R)$  область, в которой поражение человека осколками маловероятно (она ограничена величиной  $R_*$  дальности полета осколка). Если она существует, построить зависимость минимально безопасного расстояния до эпицентра взрыва от диаметра осколков.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Листинг написанной в среде GАР программы по оценке действия спектра осколков на объекты при взрывах энергоносителей в оболочках.
4. Графики зависимостей, указанных в порядке выполнения работы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом рассчитывают энергию ГПВС в случаях инертного и взрывоопасного газов?
2. Какое ограничение используется при оценке начальной скорости осколков?
3. По какому закону изменяется скорость осколка в преграде?
4. Дайте определение критической скорости.
5. Как оценивают поражающее действие осколка на человека?

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



## **ОЦЕНКА ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОЙ РАДИАЦИИ ПРИ СГОРАНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Методические указания к проведению  
практических работ по дисциплине  
«Управление рисками, системный анализ и моделирование»  
для студентов направления подготовки 20.04.01  
«Техносферная безопасность»

Курск 2021

УДК 371.64/.69:004

Составители: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.П. Тимофеев.*

**Оценка поражающего действия тепловой радиации при сгорании углеводородов:** методические указания к проведению практических работ по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова. Курск, 2021. 14 с.

В методических указаниях излагается методика расчета параметров огненных шаров, возникающих при сгорании углеводородов и дефлаграционных взрывах газопаровоздушных смесей в открытом пространстве.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд.л. 0,83. Тираж 30 экз. Заказ     . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- изучение механизмов возникновения пожаров при авариях на химически опасных объектах;
- освоение методики расчета параметров теплового потока огненного шара, образующегося при сгорании газопаровоздушных смесей;
- создание на ЭВМ в среде GАР программы по анализу поражающего действия тепловой радиации при сгорании газопаровоздушных смесей.

**ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Пожар – это стихийно развивающееся горение, не предусмотренное технологическими процессами. В случае, когда производственный процесс связан с переработкой, хранением и транспортировкой горючих веществ (например, энергоносителей), возникающий в результате аварии пожар характеризуется крупными масштабами с высокой интенсивностью горения и/или скоростью развития. Такие пожары включают и огненные шары, механизмы возникновения которых обсуждаются ниже.

Принята следующая классификация пожаров:

**Класс А.** Пожары твердых материалов (обычно органических по своей природе), в процессе которых горение сопровождается образованием раскаленных углей.

**Класс В.** Пожары жидкостей и сжиженных материалов.

**Класс С.** Пожары газов.

**Класс D.** Пожары металлов.

Далее в работе рассматриваются пожары классов В и С.

**1. Природа химических пожаров**

За исключением определенных реакций в твердых фазах, предполагается, что химическая природа пожаров заключается в окисле-



нии газовой или паровой фазы.

В качестве примера рассмотрим горение свечи. Обычная свеча изготавливается из смеси парафина (приблизительная формула  $C_{25}H_{52}$ ) с салом. Парафин – вещество горючее, но не воспламеняющееся, т. е. он горит, но с трудом, так как в холодном состоянии давление его паров незначительно. Наличие фитиля из нитки – существенная особенность, без которой свеча гореть не сможет. Когда свеча начинает устойчиво гореть, тепло от пламени растапливает воск (температура плавления  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), который благодаря капиллярному действию подпитывает фитиль. В фитиле он испаряется и/или распадается на более короткие цепочечные углеводороды; именно эти пары и продукты разложения горят в пламени. Кроме того, при горении разлагаются длинноцепочечные углеводороды, и выделяется некоторое количество свободного углерода, что и приводит к появлению дыма.

Этот процесс служит примером многих особенностей химических пожаров, из которых главная заключается в том, что пламя может давать тепло, равное скрытой теплоте плавления, испарения и разложения. В случае жидкостей необходимо количество тепла, равное именно скрытой теплоте испарения; в случае газов или паров подвода тепла не требуется совсем. Таким образом, твердые вещества с низким давлением паров будут гореть наименее интенсивно, а наибольшая интенсивность горения будет наблюдаться для воспламеняющихся газов и паров.

Промежуточным случаем является горение воспламеняющихся жидкостей, давление паров которых при обычных температурах меньше давления, соответствующего нижнему пределу воспламеняемости (НПВ), а также горение легко воспламеняющихся жидкостей с температурой вспышки (ТВ) ниже окружающей температуры.

## 2. Основные опасности химических пожаров

Явления, сопровождающие зажигание разлития или выход воспламеняющейся жидкости при потере герметичности, зависят от количества пара над разлитием, а не от полного количества разлитой жидкости. Эти явления зависят также от степени смешения воспламеняющихся паров с воздухом.

Все жидкости, способные вызывать пожары, делятся на 6 классов.

**Класс 1** – жидкости, имеющие при окружающей температуре незначительное давление паров. Прежде чем такая жидкость загорится, к ней необходимо подвести значительное количество тепла, достаточное для повышения ее температуры на несколько сотен градусов по Цельсию. Хотя подобные жидкости неспособны самостоятельно поддерживать горение, тем не менее, их можно рассматривать как составную часть более крупного пожара. Жидкостям этого класса лучше всего подходит название "трудно горящие", но никак не "воспламеняющиеся"; они не входят в круг основных химических опасностей. Примером такой жидкости может служить смазочное масло.

**Класс 2** – жидкости с высокой температурой вспышки. Для того чтобы получить давление паров, соответствующее НПВ, к ним надо подвести определенное количество тепла. Хотя такие жидкости можно называть "воспламеняющимися", они не представляют собой большой опасности. Пример: n-ксилол (температура вспышки 39 °С).

**Класс 3** – жидкости, у которых температура вспышки или равна номинальной температуре окружающей среды, или ниже ее (32 °С). В принципе над такими жидкостями, по крайней мере непосредственно над их поверхностью, находится смесь пара и воздуха в концентрации выше НПВ. На некотором расстоянии от поверхности концентрация будет ниже НПВ. Однако в зависимости от химического состава пара возможны широкие вариации его концентрации

даже для веществ, классифицируемых как легко воспламеняющиеся и при обычных температурах представляющих собой жидкости. Например, температура вспышки октана 13 °С, а диэтилового эфира – 49 °С.

Классификация воспламеняющихся веществ этого типа наименее определена, так как температура окружающей среды может изменяться по крайней мере на 30 °С. Поэтому целесообразно провести дополнительную классификацию, отнеся к классу 3 жидкости, имеющие при температуре окружающей среды давление паров между нижним и верхним пределами самовоспламенения, и выделяя отдельно жидкости класса 4.

**Класс 4** – жидкости, давление паров которых при температуре окружающей среды заключено между верхним пределом самовоспламенения (ВПВ) и атмосферным давлением. Таким образом, при температуре воздуха 20 °С октан, имеющий объемную концентрацию пара 1,3% (НПВ = 1%), следует считать веществом 3-го класса, а диэтиловый эфир с концентрацией пара 60% (ВПВ = 28%) - веществом класса 4.

**Класс 5** – воспламеняющиеся жидкости, у которых при хранении давление паров (абсолютное) около 0.1 МПа. Сюда относятся охлажденные или криогенные воспламеняющиеся газы, такие, как СПГ. Хотя при разлиии примыкающий к поверхности слой слишком богат, чтобы гореть, при рассеянии заметная доля разлития превратится в способную сгорать смесь пара и воздуха.

**Класс 6** – это сжиженные воспламеняющиеся газы. При разгерметизации оборудования значительная часть сжиженного газа выделяется в виде пара. Этот пар вместе с увлекаемыми каплями жидкости в определенных случаях можно представить как пар, образовавшийся при полном испарении жидкости, вместе с аэрозолем. Примером жидкости класса 6 может служить сжиженный пропан.

Поведение разлитых и зажженных жидкостей сильно зависит от рассмотренных выше свойств. На него влияют также конфигурация

окружения, скорость ветра и время, прошедшее с момента истечения до зажигания.

Возможны шесть случаев ответной реакции жидкости на присутствие источника зажигания.

1) Жидкости первого класса не зажигаются от находящегося в непосредственной близости источника и могут не зажечься даже при ударе пламени.

2) Жидкости второго класса не зажигаются от находящегося рядом источника, но будут зажигаться от удара пламени и гореть в самоподдерживающемся пожаре разлития.

3) Жидкости третьего класса зажигаются от находящегося рядом источника и могут быстро образовать самоподдерживающийся пожар разлития. Расстояние между источником, способным зажечь облако, и ближайшей к нему точкой разлития зависит не только от свойств облака, но и от скорости ветра. Это расстояние намного больше по ветру, чем поперек или против ветра. При некоторых обстоятельствах, когда ветер имеет скорость, намного превышающую скорость пламени, облако может выгорать не с ближайшего края разлития. Источник зажигания вызовет появление пламени, которое будет быстро перемещаться и поджигать весь объем паровоздушной смеси, концентрация которой выше НПВ. Подобную ситуацию можно назвать "вспышечным пожаром" или "пожаром облака". В таких случаях облако способно сгорать целиком.

4) Жидкости четвертого класса зажигаются от находящегося рядом источника с образованием вспышечного пожара и способны образовывать самоподдерживающийся пожар разлития. Паровое облако будет содержать переобогащенный элемент объема, и благодаря диффузии процесс горения этого элемента будет происходить только на его границе.

5) В случае разлития жидкости пятого класса находятся в равновесии со своими парами при абсолютном давлении 0.1 МПа. Подвод тепла от окружающей среды вызывает кипение, приводящее к

увеличению объема парового облака. Зажигание может произойти от источника, относительно удаленного от края разлития, и возникший в результате этого вспышечный пожар будет зажигать оболочку парового облака. Появление огненного шара возможно при очень больших разлитиях, особенно если происходит большая задержка между растеканием и зажиганием. Такие разлития будут приводить к пожару разлития.

б) Жидкости шестого класса способны зажигаться от относительно удаленного источника с образованием вспышечного пожара, а возможно, также и пожара разлития в тех случаях, когда мгновенно испарившаяся часть мала (скажем, около 0.1, как это может быть в случае бутана). Значительная часть облака окажется переобогащенной; эта часть, благодаря диффузии, будет гореть на границах своей оболочки. Если масса разлития составляет порядка тонны, вспышечный пожар может перерасти в огненный шар. В определенных случаях ситуация может усугубиться до взрыва парового облака.

Отметим, что воспламеняющиеся газы или пары (в тех случаях, когда они тяжелее воздуха) при выбросах ведут себя подобно жидкостям класса 5, но без образования пожара разлития.

Иллюстрирует сказанное зависимость на рис.1, на котором представлено поведение жидкостей описанных классов в отношении источников зажигания.

В зависимости от условий возгорание жидкости или газа может принимать две формы: пожар разлития или вид огненного шара.

Пожар разлития определяется как "разлитие воспламеняющейся жидкости, горящее устойчивым диффузионным пламенем".

Пожары разлития подразделяют на:

1) пожары с четко определенной границей и формой, последняя может быть круглой или прямоугольной (например, пожар в резервуаре хранения, когда в результате либо внутреннего, либо внешнего взрыва резервуар остается без крыши);

2) пожары, для которых форма и глубина разлития определяют

ся особенностями места разлития (выброс горючей жидкости на поверхность земли; выбросы жидкостей на поверхность водных объектов, где возможности для распространения фактически неограниченны).

Условия возникновения огненных шаров и расчет их параметров приводится ниже.

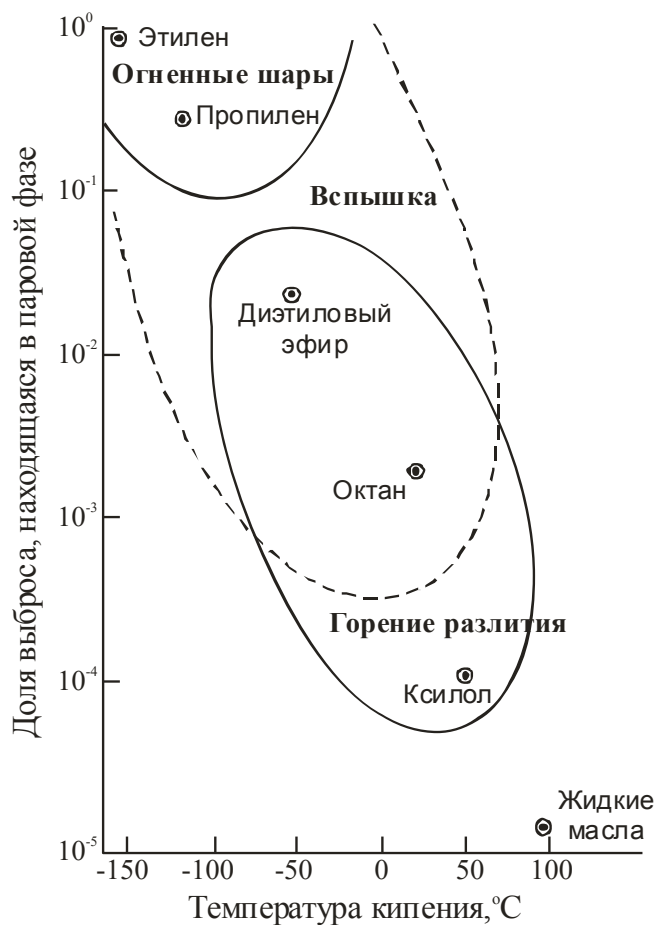


Рис. 1. Зависимость характеристик пожара от температуры кипения вещества

### 3. Расчет параметров теплового потока огненного шара, образующегося при сгорании газопаровоздушных смесей

При аварийном вскрытии газопроводов и емкостей, разлициях углеводородов и их испарении облако газопаровоздушной смеси (ГПВС), переобогащенное топливом и не способное поэтому объем-

но детонировать, начинает гореть вокруг своей внешней оболочки и вытягивается, образуя огненный шар. Большая вероятность такого процесса обусловлена также тем, что для большинства углеводородов концентрационные пределы воспламенения их ГПВС шире, чем детонации.

Такие огненные шары крайне опасны, т.к. интенсивное свечение и излучение тепла может причинить смертельные ожоги наблюдателям и зажечь, например, дерево или одежду. Поднимаясь, огненный шар образует грибовидное облако, ножка которого - это сильное восходящее конвективное течение. Такое течение может всасывать отдельные предметы, зажигать их и разбрасывать горящие предметы на большие площади.

Возникновение огненных шаров возможно при разрушениях резервуаров и сосудов с горючими жидкими перегретыми продуктами (сжиженные углеводородные газы, аммиак, хлор, фреоны, содержащиеся в замкнутых объемах при повышенном давлении).

При разрушении системы с перегретой жидкостью происходит ее разлив и быстрое испарение. Взрывной характер процесса объясняется кратковременностью аварийного вскрытия сосудов, резервуаров и другого оборудования, содержащих продукт под давлением. Например, время полного разрушения сосуда объемом  $100 \text{ м}^3$  при давлении  $1 \text{ МПа}$  составляет примерно  $7 \text{ мс}$ .

Обычно огненный шар весьма быстро (доли секунды) достигает максимума своего радиуса  $R_0$ , который сохраняется в течение всего времени существования шара.

Радиус огненного шара  $R_0$ , м, определяется из выражения

$$R_0 = 29\sqrt[3]{M},$$

а время его существования  $t_s$ , с, по формуле

$$t_s = 4.5\sqrt[3]{M},$$

где  $M$  – половина вместимости емкости по массе в тоннах.

При наличии группы из трех резервуаров за величину  $M$  принимается 90% вместимости.

Поражающее действие теплового излучения определяется теп-

ловой энергией, приходящейся на единицу поверхности на конкретном расстоянии  $r$  от центра огненного шара. Поток излучения  $q$ ,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ , падающий на мишень, определяется по формуле

$$q = E \cdot F \cdot T_p,$$

где  $E$  – мощность поверхностной эмиссии огненного шара,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $F$  – коэффициент, учитывающий фактор угла падения;  $T_p$  – проводимость воздуха. Для баллонов, вертикальных и горизонтальных резервуаров  $E = 270 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , для сосудов шарообразной формы  $E = 200 \text{ кВт}/\text{м}^2$ .

Коэффициент  $F$  и проводимость  $T_p$  определяются по формулам

$$F = \frac{R_0^2 r}{(R_0^2 + r^2)^{3/2}}, \quad T_p = 1 - 0.058 \cdot \ln r.$$

где  $r > 2R_0$  – расстояние по горизонтали от хранилища ГПВС до мишени.

Величина тепловой энергии (доза или импульс теплового излучения), падающей на единицу поверхности  $Q$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ , определяется по формуле

$$Q = q \cdot t_s.$$

Воспламенение различных материалов зависит от теплового импульса и его длительности. Минимальная величина импульса, вызывающего воспламенение древесных материалов, составляет примерно  $0.4 \text{ МДж}/\text{м}^2$ . Как видно из табл. 1, величина воспламеняющего импульса растет вместе с его длительностью, т.е. с мощностью взрыва.



Импульсы теплового излучения,  $MДж/м^2$ ,  
длительностью  $\tau$ , вызывающие воспламенение материалов

Материал	$\tau, с$			
	1.56	3.16	8.71	24.0
Древесина сухая (сосна)	0.58	0.67	0.88	1.00
Доски после распиловки (сосна, ель)	1.67	1.76	1.88	2.10
Доски, окрашенные в темный цвет	0.21	0.25	0.33	0.42
Кровля мягкая (толь, рубероид)	0.54	0.59	0.67	0.84
Стружка, солома, сено, бумага темная	0.12	0.17	0.21	0.25
Ткань вязкая черная	0.04	0.05	0.08	0.09
Ткань хлопчатобумажная коричневая	0.29	0.33	0.42	0.50
Сукно серое, брезент, кожа коричневая	0.62	0.70	0.84	1.26

Существуют разные подходы к оценке степени поражения человека от действия тепловой радиации при быстром сгорании углеводов и дефлаграционных взрывах газопаровоздушных смесей.

Так, например, болевой температурный порог для кожи человека соответствует температуре  $T_n \approx 44 \text{ }^\circ\text{C}$ . При  $T > T_n$  степень поражения зависит от удельной энергии  $Q$  и длительности облучения  $\tau$ . Считается, что без болевых ощущений кожа выдерживает тепловой поток интенсивностью  $q \approx 21 \text{ кВт/м}^2$  в течение 2 с. При стационарном потоке этим данным соответствует  $Q \approx 42 \text{ кДж/м}^2$ . Исходя из этих данных, предельно безопасный радиус  $R_E$  (по В. Маршаллу — радиус эвакуации) для человека составляет примерно  $(3.1...3.6) \cdot R_0$ .

Оценить степень поражения человека при действии тепловой радиации можно по графику рис. 2, на котором дана зависимость процента поражения (вероятности поражения)  $\lambda$  от параметра тепловой радиации  $Q = q^{4/3} \cdot t_s, (\text{Вт/м}^2)^{4/3} \cdot \text{с}$ . При этом степеням поражения соответствуют ожоги кожи на глубину меньше 0.12 мм — 1 степень, меньше 2 мм — 2 степень и больше 2 мм — 3 степень.

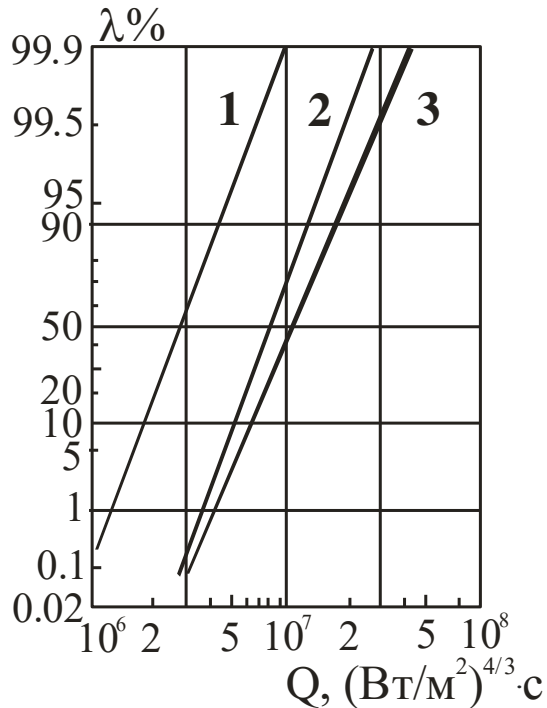


Рис. 2. Зависимость процента потерь людей без защитной одежды от воздействия тепловой радиации при горении углеводородов:

1 – первая степень поражения, 2 – вторая степень поражения, 3 – третья степень поражения (летальный исход)

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Рассчитать параметры огненного шара, образующегося при сгорании пропано-воздушной смеси в результате разлива 100...1000 тонн (емкость емкости задается преподавателем) жидкого пропана, определить порог воспламенения объектов (материал задается преподавателем) и оценить степень поражения населения. Для этого:

1. Составить на ЭВМ в среде GАР программу по расчету характеристик огненного шара. Построить графики зависимостей параметров теплового излучения от расстояния до хранилища ГПВС.

2. Определить минимальное расстояние, на котором не может возникнуть возгорание материальных объектов. Для нахождения импульса теплового излучения, вызывающего воспламенение заданного материала, на основе приведенных в указаниях табличных данных определить аппроксимирующую функцию, используя встроенные в GАР средства интерполяции сплайнами.

3. Оценить риск поражения населения, находящегося в районе аварии. Для этого, используя зависимости, представленные на рис.2, рассчитать на местности границы зон, соответствующих различным степеням поражения. Для определения функций, описывающих зависимости процента потерь, использовать встроенную в GAP функцию линейной интерполяции *linterp*.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Листинг написанной в среде GAP программы расчета характеристик огненного шара.
4. Графики зависимостей поражающего действия огненного шара от расстояния.
5. Таблица с результатами расчета людских потерь по зонам поражения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение пожара.
2. Объясните природу химических пожаров.
3. Перечислите основные опасности химических пожаров.
4. Каковы ответные реакции горючей жидкости на присутствие источника зажигания?
5. Какие формы может принимать возгорание жидкости или газа?
6. Поясните условия возникновения огненного шара.