

И. Б. Палымский

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Новосибирск
СГУГиТ
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

И. Б. Палымский

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебно-методического пособия по специальности
17.05.01 Боеприпасы и взрыватели (уровень специалитета)

Новосибирск
СГУГиТ
2024

УДК 623.4
П14

Рецензенты: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН *П. А. Фомин*
кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *И. Н. Карманов*

Палымский, И. Б.

П14 Методы испытаний средств поражения : учебно-методическое пособие / И. Б. Палымский. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – 38 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907711-73-0

Учебно-методическое пособие подготовлено доктором физико-математических наук, профессором И. Б. Палымским на кафедре специальных устройств, инноватики и метрологии СГУГиТ.

Приведена классификация осколочно-фугасных боеприпасов по значению коэффициента нагрузки и основные соотношения для расчетов характеристик сильной и слабой ударных волн при воздушном взрыве. Прилагаются примеры решений характерных задач по расчету характеристик ударных волн при воздушном взрыве, для самостоятельного решения предложены варианты расчетно-графической работы.

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Методы испытаний средств поражения» предназначено для обучающихся по специальности 17.05.01 Боеприпасы и взрыватели (уровень специалитета).

Рекомендовано к изданию кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 623.4

ISBN 978-5-907711-73-0

© СГУГИТ, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Взрыв фугасного боеприпаса в воздухе	5
1.1. Общие сведения и классификация фугасных боеприпасов	5
1.2. Обзор физических явлений при взрыве ФБ в воздухе	8
1.3. Параметры воздушной ударной волны	9
2. Решение прямой и обратной задач при расчете характеристик взрыва фугасного боеприпаса в воздухе	18
2.1. Решение прямой задачи	18
2.2. Решение обратной задачи	19
2.3. Примеры решений прямой и обратной задач	20
2.4. Расчетно-графическая работа по расчету характеристик взрыва фугасного боеприпаса	24
Заключение	36
Библиографический список	37

ВВЕДЕНИЕ

Вплоть до настоящего времени осколочно-фугасные боеприпасы являются одним из основных видов состоящих на вооружении боеприпасов. При этом их поражающее действие обеспечивается как формирующимся при взрыве разрывного заряда осколочным полем, так и фугасным действием проходящей по среде ударной волны.

Боеприпасы сравнительно небольшого калибра не создают достаточно сильную ударную волну и поэтому их основное поражающее действие достигается за счет формирования осколочного поля.

В свою очередь, боеприпасы большого калибра, с большим весом разрывного заряда, формируют при взрыве мощную ударную волну с большими перепадами давления, температуры и близкую к предельному сжатию среды. Для таких боеприпасов фугасное действие является основным.

1. ВЗРЫВ ФУГАСНОГО БОЕПРИПАСА В ВОЗДУХЕ

1.1. Общие сведения и классификация фугасных боеприпасов

Под фугасным действием понимают разрушающее действие самих зарядов взрывчатых веществ (ВВ), которыми снаряжены средства поражения и боеприпасы, обусловленное взаимодействием продуктов взрыва (ПВ) и ударной волны (УВ).

Хотя все средства поражения и боеприпасы, снаряженные взрывчатыми веществами, обладают в той или иной мере фугасным действием, под фугасными средствами поражения и боеприпасами понимают боеприпасы крупного калибра, содержащие значительное количество разрывного ВВ, для которых фугасное действие является основным поражающим фактором.

Приведем классификацию фугасных боеприпасов (ФБ) по значению коэффициента нагрузки β – весу разрывного ВВ, отнесенного к весу оболочки боеприпаса [1].

Самым высоким значениям коэффициента нагрузки соответствуют фугасные авиабомбы (табл. 1). Среднее значение коэффициента нагрузки у фугасных бомб равно 0,787.

Таблица 1

Значения коэффициента нагрузки для фугасных авиабомб

Наименование бомбы	M – вес бомбы, кг	$m_{\text{ВВ}}$ – вес ВВ, кг	$\beta = m_{\text{ВВ}}/(M - m_{\text{ВВ}})$
ФАБ-250	250	99	0,655
ФАБ-500	500	213	0,742
ФАБ-1500	1400	675	0,931
ФАБ-5000	4900	2207	0,820

Относительно большие значения коэффициента нагрузки здесь связаны с тем, что при полете авиабомб не развиваются особо большие перегрузки и поэтому здесь нет особого смысла делать толстостенный сверхпрочный корпус, что позволяет увеличить вес разрывного ВВ.

Фугасные мины по значению коэффициента нагрузки занимают промежуточное положение между авиабомбами и снарядами (табл. 2), среднее значение коэффициента нагрузки здесь равно 0,265.

Таблица 2

Значения коэффициента нагрузки для фугасных мин

Мина, калибр, материал	M – вес мины, кг	$m_{\text{ВВ}}$ – вес ВВ, кг	$\beta = m_{\text{ВВ}}/(M - m_{\text{ВВ}})$
Ф-853, Ф-852, 160 мм, чугун	40,87	7,45	0,223
Ф-853А, Ф-853АУ, 160 мм, чугун	41,14	7,72	0,231
Ф-625, 203 мм, сталь	41,14	9	0,280
Ф-625, 203 мм, сталь	130,70	31,95	0,323

Однако наиболее интересная ситуация наблюдается у фугасных снарядов (табл. 3).

Таблица 3

Значения коэффициента нагрузки для фугасных снарядов

Снаряд, калибр	M – вес снаряда, кг	$m_{\text{ВВ}}$ – вес разрывного заряда, кг	$\beta = m_{\text{ВВ}}/(M - m_{\text{ВВ}})$
Ф-572, 180 мм	88	10,7	0,138(Д)
Ф-625, 203 мм	100	23,4	0,305
Ф-625д, 203 мм	100	15,8	0,188(Д)
Ф-643, 210 мм	133	18,8	0,165(Д)
Ф-644, 210 мм	133	15,6	0,133(Д)

Видно четкое разделение на два класса – недальнобойные и дальнобойные боеприпасы. Недальнобойным фугасным снарядам соответствует сравнительно большое значение коэффициента нагрузки $\beta = 0,305$, при этом среднее значение коэффициента нагрузки у дальнобойных снарядов равно $0,156$, то есть почти в два раза меньше. Столь низкое значение коэффициента нагрузки у дальнобойных снарядов связано с необходимостью выдерживать большие нагрузки при разгоне снаряда в стволе.

В качестве примера рассмотрим фугасные боеприпасы Ф-625 и Ф-625д для 203-миллиметровой гаубицы Б-4 1931 г., известной как «кувалда Сталина».

Недальнобойный фугасный снаряд Ф-625 имеет максимальное значение начальной скорости при вылете из ствола гаубицы, равное 573 м/с [2] при дальности выстрела $13\ 600$ м.

Считая движение снаряда в стволе равноускоренным, имеем соотношение, связывающее длину ствола $l = 5,085$ м [2], начальную скорость снаряда в момент его вылета из ствола V_0 и ускорение снаряда a при его движении в стволе гаубицы

$$l = \frac{V_0^2}{2a},$$

откуда получаем формулу для определения действующей на снаряд силы при его разгоне в стволе

$$F = \frac{M}{2l} V_0^2; \quad F = 9,83 \cdot V_0^2. \quad (1)$$

Подсчет по формуле (1) показывает, что при разгоне в стволе гаубицы снаряда Ф-625, выпущенного на его максимальную дальность, на снаряд весом $M = 100$ кг действует сила порядка 320 тс.

Дальнобойный фугасный снаряд Ф-625д имеет максимальное значение начальной скорости при полном метательном заряде $V_0 = 607$ м/с и дальность выстрела $17\ 890$ м [2].

Подсчет по формуле (1) показывает, что при разгоне в стволе гаубицы снаряда Ф-625д действующая на снаряд сила имеет порядок 360 тс.

Повышенная нагрузка на снаряд Ф-625д (сила (давление) на оболочку боеприпаса) обуславливает увеличение толщины стенок оболочки боеприпаса за счет уменьшения веса разрывного заряда, последнее находит свое отражение в сравнительно низких значениях коэффициента нагрузки β у дальнобойных боеприпасов.

1.2. Обзор физических явлений при взрыве ФБ в воздухе

В контексте данной работы наиболее важными представляются характеристики УВ как основного поражающего фактора при подрыве ФБ, поэтому лишь кратко опишем наблюдающиеся при воздушном взрыве ФБ физические процессы, за деталями отсылая к [4]. Там же рассмотрены и результаты численного интегрирования, выполненного на основе полной нелинейной системы уравнений газовой динамики.

Образующиеся в результате взрыва заряда конденсированного ВВ сильно нагретые и сжатые до весьма высокого давления продукты взрыва (ПВ) при своем расширении производят резкий удар по окружающей среде. При этом давление на границе раздела «ПВ – окружающая среда» падает до 500–900 атм., а вглубь ПВ с их внешней поверхности со скоростью, равной местной скорости звука, начинает распространяться волна разрежения (ВР).

При взрыве 1,5 кг конденсированного ВВ, занимающего объем около 1 л, образуются газы под давлением порядка 10^5 атм., которые после своего расширения до атмосферного давления и охлаждения до комнатной температуры займут объем около 1,5 м³. Для типичных конденсированных ВВ в начальный момент взаимодействия ПВ с воздухом скорость расширения ПВ может достигать нескольких километров в секунду. По мере дальнейшего расширения ПВ их скорость уменьшается, так как они при этом сжимают и вовлекают в движение все большую и большую массу воздуха.

Слой сжатого продуктами взрыва воздуха формирует воздушную ударную волну (ВУВ) с четким перепадом давления на ее фронте. С течением

времени уменьшается как давление внутри ПВ, так и перепад давления на фронте ВУВ.

Постепенно скорость движения ПВ спадает практически до нуля, а давление в них вследствие инерционности газов становится меньше давления в окружающей среде. Вследствие этого продукты взрыва изменяют направление движения и начинают двигаться в обратном направлении – к центру взрыва.

Теперь ВУВ и ПВ двигаются в разные стороны, другими словами, ВУВ как бы отрывается от ПВ и продолжает распространяться уже самостоятельно. При этом между ВУВ и границей ПВ образуется зона с давлением меньшим атмосферного.

Очевидно, что массовая скорость слоя воздуха, сжатого ударной волной, будет тем меньше, чем меньше давление в этом слое и чем дальше этот слой удален от фронта УВ. Все это сопровождается увеличением ширины зоны сжатия и уменьшением избыточного давления на фронте волны, что обусловлено тем, что по мере удаления УВ от точки взрыва увеличивается площадь поверхности волны и, следовательно, возрастает масса вовлеченного в движение воздуха. Кроме того, уменьшение давления связано с необратимым характером сжатия воздуха в УВ, сопровождающимся превращением его кинетической энергии в тепловую.

Сильная свободно бегущая ударная волна постепенно теряет свою энергию, оставляя за собой нагретый воздух, на некотором расстоянии от места взрыва превращается в слабую УВ и, полностью потеряв свою энергию на больших расстояниях от места взрыва, превращается в обычную звуковую волну.

1.3. Параметры воздушной ударной волны

Обозначая индексом 0 все величины перед ударной волной, а индексом 1 – соответствующие величины за ударной волной, кратко опишем формулы для расчета характеристик ударной волны при взрыве в воздухе. В этом случае в общих формулах полагается $P_0 = 1$ атм., $P_1 = 1 + \Delta P$, $\rho_0 = 1,225$ кг/м³

и $T_0 = 288$ К. По умолчанию мы рассматриваем сравнительно слабые ударные волны (при $\Delta P < 10$ атм. и $\gamma = 1,4$), а в случае более интенсивных ударных волн (при $\Delta P > 10$ атм.) необходимо учитывать зависимость эффективного значения адиабаты γ от интенсивности волны. Более подробный вывод этих формул можно найти в [4].

Как это следует из соотношений на ударных волнах в газе, плотность за ударной волной ρ_1 может быть выражена через перепад давления за ударной волной ΔP по формуле

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P}. \quad (2)$$

Устремляя перепад давления ΔP к бесконечности (для экстремально сильной ударной волны), из формулы (2) можно получить, что максимально возможная степень сжатия воздуха при прохождении ударной волны определяется величиной адиабаты γ

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}. \quad (3)$$

Полагая в соотношении (2) $\gamma = 1,4$, для взрыва в воздухе получим

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \cdot \Delta P}{7 + \Delta P}. \quad (4)$$

Для скорости ударной волны D справедливо соотношение

$$D = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \Delta P}; \quad c_0 = 340 \text{ м/с}, \quad (5)$$

где c_0 есть скорость звука в покоем воздухе.

Из формулы (5) для скорости ударной волны при взрыве в воздухе находим

$$D = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) видно, что скорость ударной волны D всегда больше скорости звука в покоем воздухе c_0 .

Массовую скорость воздуха за ударной волной можно вычислить как

$$u = \frac{\Delta P}{\rho_0 D}; u = \frac{1,28 \Delta P}{\sqrt{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}}. \quad (7)$$

Поскольку воздух перед ударной волной покоится, то массовая скорость воздуха перед ударной волной равна 0.

Из (7) получим соотношение для массовой скорости ударной волны при взрыве в воздухе

$$u = 243 \cdot \frac{\Delta P}{\sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P}}. \quad (8)$$

Для температуры воздуха за фронтом ударной волны справедливо соотношение

$$T_1 = (1 + \Delta P) \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1} \cdot T_0; T_1 = 288 \cdot \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P} \cdot (1 + \Delta P). \quad (9)$$

Из (9) следует соотношение для температуры за фронтом ударной волны при воздушном взрыве:

$$T_1 = 288 \cdot \frac{(1 + \Delta P) \cdot (7 + \Delta P)}{7 + 6 \cdot \Delta P}. \quad (10)$$

Нагрев массы воздуха проходящей ударной волной приводит к увеличению значения скорости звука за фронтом ударной волны:

$$c_1 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P}} \cdot (1 + \Delta P). \quad (11)$$

Из соотношения (11) при $\gamma = 1,4$ получаем выражение для значения скорости звука за фронтом ударной волны при взрыве в воздухе

$$c_1 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{(1 + \Delta P) \cdot (7 + \Delta P)}{7 + 6 \cdot \Delta P}}; \quad c_0 = 340 \text{ м/с.} \quad (12)$$

Еще раз подчеркнем, что формулы (4), (6), (8), (10) и (12) справедливы для относительно слабого взрыва в воздухе при $\Delta P < 10$ атм., когда еще не происходит разрушение структуры молекул воздуха и можно считать, что $\gamma = 1,4$. В противном случае разрушение структуры молекул воздуха обуславливает протекание процессов диссоциации и ионизации, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты γ (табл. 4). Расчет характеристик более интенсивных ударных волн (при $\Delta P > 10$ атм.) следует проводить по более полным формулам (2), (5), (7), (9) и (11) с учетом эффективного значения адиабаты γ , которое вычисляется по данным табл. 4. В ней дополнительно, как функция перепада давления, приведена температура за ударной волной.

Отметим интересную особенность ударных волн, которая заключается в том, что давление и температура воздуха за фронтом ударной волны могут быть как угодно большими (это определяется количеством ВВ), а увеличение плотности при этом лимитируется значением показателя адиабаты согласно формуле (3).

Таблица 4

Показатель адиабаты как функция перепада давления

ΔP , атм.	T_1 , °К	γ	ΔP , атм.	T_1 , °К	γ
0,01	289	1,4	10,0	804	1,39
0,10	296	1,4	100	3 630	1,26
1,00	354	1,4	1 000	17 878	1,13

Как уже отмечалось выше, главным поражающим фактором фугасных боеприпасов является ударная волна, эффективность действия которой определяется величиной избыточного давления на ее фронте. В свою очередь, если взрывать снаряженный тротилом боеприпас, то величина избыточного

давления на фронте УВ зависит от массы взорванного тротила и расстояния от эпицентра взрыва до точки наблюдения.

После обработки экспериментальных данных, на основе теории размерности М. А. Садовским предложена эмпирическая формула, связывающая перепад давления на фронте ударной волны ΔP , массу взорванного заряда m и расстояние от эпицентра взрыва до точки наблюдения r (рис. 1):

$$\Delta P = 0,84 \cdot x + 2,7 \cdot x^2 + 7 \cdot x^3, x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (13)$$

Формула Садовского (13) описывает взрыв тротила без металлической оболочки (удельная теплота взрыва $Q = 4,1$ МДж/кг) при нормальных атмосферных условиях ($P_0 = 1$ атм.) на некоторой высоте, исключая влияние отражающего действия земной поверхности на величину ΔP . Формула Садовского (13) получена для сильных ударных волн, когда вес ВВ превышает 100 кг, в приближении слабых УВ она совпадает с формулой В. В. Адушкина, которая получена в результате обработки данных по взрывам малых зарядов ВВ весом до 0,1 кг [5].

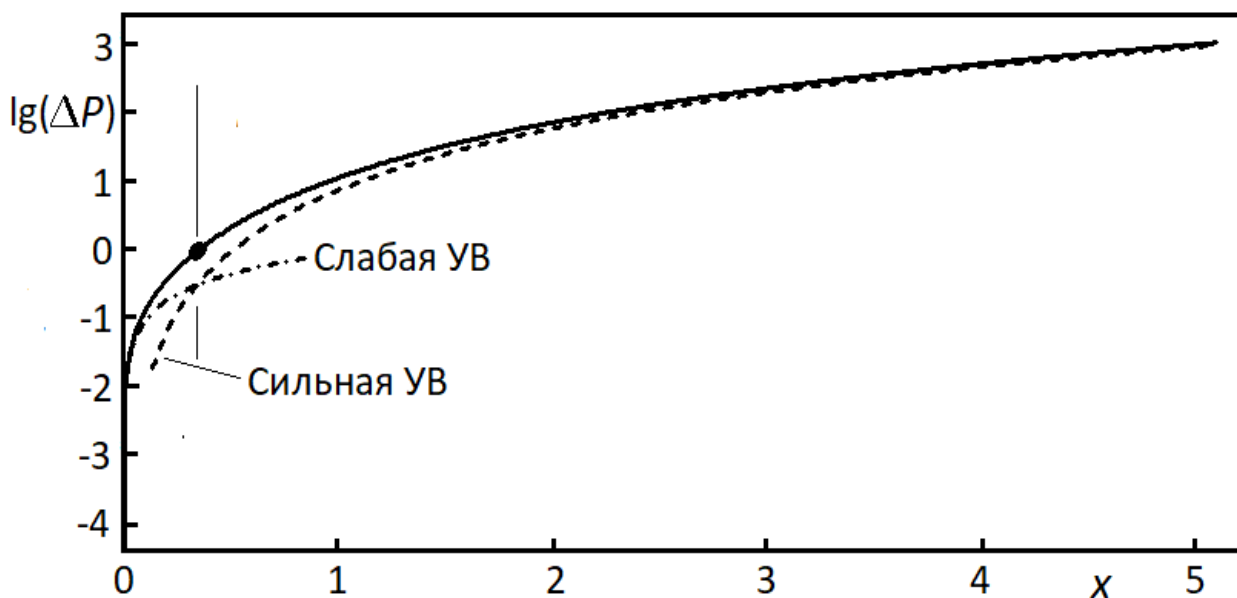


Рис. 1. Перепад давления при воздушном взрыве

Для сильных ударных волн ($\Delta P \gg 1$ атм.) можно пользоваться асимптотической зависимостью, которая следует из (13):

$$\Delta P = 7 \cdot x^3; x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (14)$$

Асимптотика для слабых ударных волн ($\Delta P \ll 1$ атм.) описывается линейной зависимостью, которая также следует из (13):

$$\Delta P = 0,84 \cdot x; x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (15)$$

Асимптотики, построенные для сильной (14) и слабой (15) волн показаны на рис. 1 штриховой и штрихпунктирной линиями соответственно. Примерная граница областей, где данные асимптотики справедливы (верхняя граница для слабой УВ и нижняя – для сильной, закрашенный кружок соответствует $\Delta P \approx 1$ атм.), показана на рис. 1 тонкой сплошной вертикальной линией.

Другими словами, если $\Delta P \ll 1$ атм., то следует использовать асимптотику (15), а при $\Delta P \gg 1$ атм. – (14).

При расчете характеристик ударных волн средней интенсивности ($\Delta P \sim 1$ атм.) следует пользоваться полным уравнением (13). Для решения уравнения (13) следует по заданному значению ΔP с графической точностью определить по рис. 1 соответствующее начальное приближение x и затем уточнить это значение методом Ньютона или простым подбором. Значению $\Delta P = 1$ атм. на рис. 1 соответствует $x = 0,36$.

В первом приближении можно считать, что наземный взрыв по своим характеристикам соответствует воздушному взрыву с удвоенным весом ВВ, так как при наземном взрыве энергия распределяется по полусфере, а не по сфере, как при воздушном взрыве. Таким образом, все характеристики наземного взрыва могут быть получены из соответствующих характеристик воздушного взрыва простым удвоением веса ВВ, однако тут надо иметь в виду, что при таком подходе не учитывается мягкость земной поверхности, т. е. затраты энергии на образование воронки. При этом, поскольку слабый взрыв не приводит к образованию воронки в эпицентре, то увеличение эффективности

разрушительного действия УВ при замене воздушного взрыва наземным должно проявляться сильнее при сильном взрыве.

Путем обработки данных по наземному взрыву тротилового заряда без металлической оболочки получена следующая зависимость (рис. 2):

$$\Delta P = 0,95 \cdot x + 3,9 \cdot x^2 + 13 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (16)$$

На рис. 2 обозначения те же, что и на рис. 1.

Для сильных ударных волн ($\Delta P \gg 1$ атм.) также можно пользоваться асимптотической зависимостью:

$$\Delta P = 13 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (17)$$

Из формулы (17) видно, что при сильном наземном взрыве перепад давления почти в два раза ($13/7 = 1,86 \approx 2$) больше, чем при воздушном взрыве с такими же параметрами.

Асимптотика для слабых ударных волн ($\Delta P \ll 1$ атм.) линейная:

$$\Delta P = 0,95 \cdot x, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (18)$$

Из формулы (18) видно, что в случае слабых ударных волн перепад давления незначительно ($0,95/0,84 = 1,13$, на 13 %) больше у наземного взрыва по сравнению с воздушным.

Асимптотики, построенные для сильных (17) и слабых (18) ударных волн, показаны на рис. 2 штриховой и штрихпунктирной линиями соответственно. Примерная граница областей, где данные асимптотики справедливы (верхняя граница для слабой УВ и нижняя для сильной, закрашенный кружок соответствует $\Delta P \approx 1$ атм.), показана на рис. 2 тонкой сплошной вертикальной линией.

Если $\Delta P \ll 1$ атм., то используется асимптотика (18), а если $\Delta P \gg 1$ атм., то (17).

При расчете характеристик ударных волн средней интенсивности ($\Delta P \sim 1$ атм.) следует пользоваться полным уравнением (16). Сначала по заданному значению ΔP с графической точностью по рис. 2 определяется

соответствующее начальное приближение для x , которое затем уточняется методом Ньютона или простым подбором. Значению $\Delta P = 1$ атм. на рис. 2 соответствует $x = 0,3$.

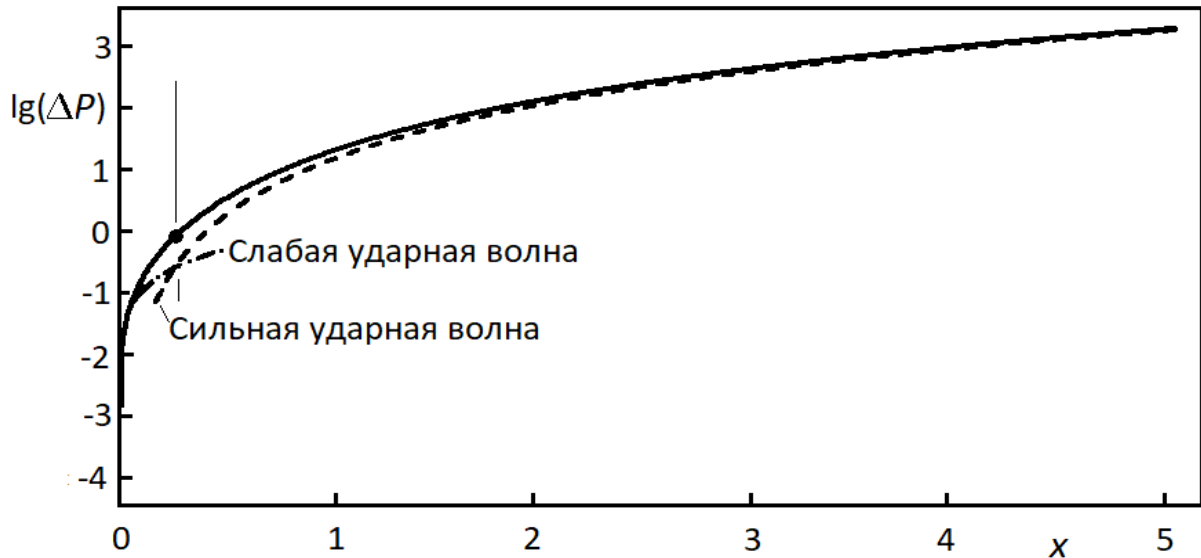


Рис. 2. Перепад давления при наземном взрыве

Важной характеристикой является продолжительность действия τ избыточного давления, которая для воздушного взрыва выражается эмпирической формулой

$$\tau^+ = 1,3 \cdot m^{1/6} \cdot r^{1/2} \cdot 10^{-3}. \quad (19)$$

Для наземного взрыва формула для продолжительности действия избыточного давления получается подстановкой $2m$ вместо m в формуле (19)

$$\tau^+ = 1,46 \cdot m^{1/6} \cdot r^{1/2} \cdot 10^{-3}. \quad (20)$$

Сравнение формул (2) и (19) показывает, что продолжительность действия избыточного давления при наземном взрыве на 12 % больше, чем при воздушном, то есть наблюдаемое различие сравнительно небольшое.

Последнее связано со сравнительно слабой зависимостью продолжительности действия избыточного давления от веса взорванного ВВ.

Важной характеристикой взрывной эффективности является удельный импульс

$$I = \int_0^{\tau^+} \Delta P \cdot dt,$$

для определения которого предложены эмпирические формулы.

Величина удельного импульса I , Па·с может быть вычислена для воздушного взрыва

$$I = 126 \cdot m^{2/3} / r \quad (21)$$

и для наземного

$$I = 200 \cdot m^{2/3} / r. \quad (22)$$

Выражение для удельного импульса в случае наземного взрыва (22) получено из аналогичной формулы для воздушного взрыва (21) подстановкой в нее $2m$ вместо m . Сравнение формул (20) и (19) показывает, что величина удельного импульса при наземном взрыве на 60 % больше, чем при воздушном, т. е. здесь наблюдается заметное различие.

2. РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА ФУГАСНОГО БОЕПРИПАСА В ВОЗДУХЕ

2.1. Решение прямой задачи

При решении прямой задачи по заданным параметрам непосредственным вычислением определяются характеристики УВ, причем считается, что все члены в правых частях формул известны или могут быть вычислены, а то, что находится в левой части, подлежит определению с помощью формул.

В частности, по заданному перепаду давления вычисляется (i) – плотность воздуха ρ_1 за фронтом ударной волны по формулам (2) и (4), (ii) – скорость ударной волны D (5) и (6), (iii) – массовая скорость воздуха за ударной волной u (7) и (8), (iv) – температура воздуха за ударной волной T_1 (9) и (10), (v) – скорость звука за фронтом ударной волны c_1 (11) и (12).

Еще раз подчеркнем, что формулы (4), (6), (8), (10) и (12) можно использовать для ударных волн при $\Delta P < 10$ атм., когда не происходит разрушения структуры молекул воздуха и можно считать, что $\gamma = 1,4$. В противном случае разрушение структуры молекул воздуха обуславливает протекание процессов диссоциации и ионизации, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты γ (см. табл. 4). Расчет характеристик ударных волн при $\Delta P > 10$ атм. проводится по более полным формулам (2), (5), (7), (9) и (11) с учетом эффективного значения адиабаты γ , вычисленного по данным из табл. 4.

Прямой подстановкой в формулы заданных значений массы взорванного тротила m и расстояния от эпицентра взрыва r вычисляется (i) – перепад давления ΔP (формулы (13)–(15) для воздушного взрыва и (16)–(18) для наземного), (ii) – продолжительность действия избыточного давления τ^+ (формула

(19) для воздушного взрыва и (20) для наземного), (iii) – удельный импульс I (формула (21) для воздушного взрыва и (22) для наземного).

2.2. Решение обратной задачи

При решении обратной задачи по расчету характеристик УВ считается, что все члены в левых частях формул известны или могут быть вычислены, а то, что находится в правой части, подлежит определению с помощью формул. Тут нужно отметить, что решение обратной задачи, как правило, значительно сложнее, чем прямой, поскольку получаемые здесь фактически новые соотношения можно рассматривать как неявные или обратные функции.

Для примера покажем, как из соотношения (2) определить перепад давления при известных значениях плотности до и за фронтом УВ.

Итак, соотношение (2) имеет вид

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1) \Delta P}.$$

Выражая отсюда перепад давления ΔP , находим

$$\Delta P = 2\gamma \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0(\gamma + 1) - \rho_1(\gamma - 1)}.$$

Можно видеть, что перепад давления из последнего выражения не может быть найден, если знаменатель последнего соотношения равен нулю:

$$\rho_0(\gamma + 1) - \rho_1(\gamma - 1) = 0.$$

Или, другими словами, определение перепада давления из формулы (2) не представляется возможным при выполнении соотношения

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1},$$

которое совпадает с соотношением (3) для отношения плотностей при стремлении перепада давления к бесконечности.

На основе соотношения (2) могут быть рассмотрены и другие обратные задачи, например, определение показателя адиабаты γ по известным значениям перепада давления ΔP и плотностей ρ_0 и ρ_1 .

Таким образом, при решении обратной задачи используются те же формулы, что и для решения прямой, но соответствующие соотношения рассматриваются как обратные функции и должны быть обращены.

2.3. Примеры решений прямой и обратной задач

Как показано в подразд. 2.2, соотношения сильно упрощаются в случаях слабой ($\Delta P \ll 1$ атм.) или сильной ($\Delta P \gg 1$ атм.) ударных волн, так как при этом получаются наиболее простые формулы.

При проведении расчетов характеристик УВ при $\Delta P < 10$ атм. можно полагать значение показателя адиабаты γ равным 1,4, так как при таких относительно небольших перепадах давления еще не происходит разрушение структуры молекул воздуха. В противном случае при более значительных перепадах давления $\Delta P > 10$ атм. неизбежно возникающее разрушение структуры молекул воздуха запускает в среде процессы диссоциации и ионизации, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты γ , значения которого следует вычислять по данным табл. 4.

При расчете характеристик слабых УВ широко используется один из самых эффективных методов приближенных вычислений – метод малого параметра. В данном случае малым можно считать перепад давления, плотностей, температур и т. п. В методе малого параметра сложные выражения и функции заменяются их разложениями в степенные ряды по малому параметру, причем для простоты вычислений здесь ограничиваются первым главным членом степенного ряда.

При расчетах характеристик слабых УВ используются приближенные формулы, где малый параметр x ($x \ll 1$) может быть любым выражением, и кроме того, эти формулы остаются справедливыми при замене x на $-x$.

$$\frac{1}{1+x} = 1-x, \quad \sqrt{1+x} = 1+x/2, \quad (1+Ax) \cdot (1+Bx) = 1+(A+B) \cdot x,$$

$$\sin x = x, \quad \cos x = 1, \quad \operatorname{tg} x = x, \quad e^x = 1+x, \quad \ln(1+x) = x, \quad (1+x)^n = 1+nx.$$

При расчетах характеристик сильных УВ в соответствующих выражениях осуществляется переход к пределу при стремлении к бесконечности перепада давления либо путем алгебраических манипуляций первоначальные соотношения приводятся к выражениям с малым параметром, которые затем рассматриваются аналогично случаю слабой ударной волны.

При расчете характеристик ударных волн средней интенсивности ($\Delta P \sim 1$ атм.) следует пользоваться полным уравнением (13) или (16). Сначала по заданному значению ΔP с графической точностью определяется соответствующее начальное приближение x по рис. 1 или рис. 2, а затем это значение уточняется методом Ньютона или простым подбором.

Приведем несколько примеров решения характерных задач.

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при избыточном давлении $\Delta P = 10$ атм. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Решение. По заданному перепаду давления $\Delta P = 10$ атм. по табл. 4 находим значение показателя адиабаты $\gamma = 1,39$. Затем по формуле (2) находим значение плотности за ударной волной

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P}, \quad \rho_1 = 1,225 \cdot \left(\frac{2 \cdot 1,39 + (1,39 + 1) \cdot 10}{2 \cdot 1,39 + (1,39 - 1) \cdot 10} \right) = 4,893 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 2. Как зависит плотность за ударной волной от перепада давления в случае слабой УВ, т. е. при малом перепаде давления?

Решение. Используя формулу (4) для УВ при $\Delta P < 10$ атм., имеем для плотности за ударной волной

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \cdot \Delta P}{7 + \Delta P}, \quad \rho_1 = \rho_0 \cdot \left(\frac{1 + \frac{6}{7} \cdot \Delta P}{1 + \frac{1}{7} \cdot \Delta P} \right), \quad \rho_1 = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{5}{7} \cdot \Delta P \right).$$

Такой же результат может быть получен из более общей формулы (2).

Задача 3. Как зависит температура воздуха за ударной волной от перепада давления в случае сильной УВ, т. е. при большом перепаде давления?

Решение. Используя общую формулу (9) и учитывая в числителе и знаменателе члены с наибольшими степенями ΔP , имеем для температуры за ударной волной

$$T_1 = 288 \cdot \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P} \cdot (1 + \Delta P) \approx 288 \cdot \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)} \cdot \Delta P.$$

Задача 4. Какое количество m тротила взорвали, если при воздушном взрыве на расстоянии $r = 10$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 3$ атм.?

Решение. УВ при заданном перепаде давления является сильной, и поэтому можно применить формулу (14)

$$\Delta P = 7 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r.$$

Отсюда последовательно находим

$$x = \sqrt[3]{3/7} = 0,754, \quad m = (0,754 \cdot 10)^3 \approx 430 \text{ кг.}$$

Задача 5. Какое количество m тротила взорвали, если при воздушном взрыве УВ на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Решение. УВ при заданном перепаде давления является слабой и поэтому можно применить формулу (15)

$$\Delta P = 0,84 \cdot x, \quad x = \sqrt[3]{m} / r.$$

Отсюда последовательно находим, что

$$x = 0,1 / 0,84 = 0,12, \quad m = (0,12 \cdot 5)^3 = 0,22 \text{ кг.}$$

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 100$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Решение. Как показано на рис.1, 2, сильная УВ становится слабой при понижении перепада давления ΔP до порогового значения $\Delta P_g = 1$ атм. Из рис. 1 можно видеть, что перепад давления равен 1 при значении x в интервале (0,3; 0,4).

Вычисляем значения перепада давления по формуле (13):

$$\Delta P = 0,84 \cdot x + 2,7 \cdot x^2 + 7 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r.$$

При $x = 0,3$ и $0,4$

$$x = 0,3, \quad \Delta P = 0,684; \quad x = 0,4, \quad \Delta P = 1,216.$$

Значение x , при котором $\Delta P = \Delta P_g = 1$ атм., найдем построением линейного интерполянта $\Delta P = a \cdot x + b$, коэффициенты которого определим путем решения системы двух линейных уравнений для неизвестных a и b :

$$a \cdot 0,3 + b = 0,684; \quad a \cdot 0,4 + b = 1,216.$$

Отнимая первое уравнение от второго, получим значение коэффициента a (5,32), а затем из первого уравнения находим b (-0,912).

И, наконец, определяем искомое значение x из соотношения

$$x = (\Delta P_g - b) / a = 0,3594.$$

Точное значение, которое получается численным решением исходного кубического уравнения, равно 0,3638, которое отличается от полученного значения на 1,2 %. Точность полученного приближенного значения вполне достаточна, но при желании ее можно повысить, например, сужая интервал поиска решения до (0,35; 0,37) и повторяя вычисления по описанному выше алгоритму.

2.4. Расчетно-графическая работа по расчету характеристик взрыва фугасного боеприпаса

Здесь приведем варианты РГР по расчету характеристик ударной волны, образующейся при взрыве ФБ. Каждый вариант РГР состоит из 6 задач, номер варианта должен совпадать с номером в списке группы. При необходимости приближенное значение адиабаты Пуассона γ определяется по данным табл. 4, по известному перепаду давления или температуре воздуха за ударной волной.

Приведем пример определения значения адиабаты γ при $\Delta P = 200$ атм. по данным табл. 4.

Считая базовыми значения адиабаты при $\Delta P = 1\ 000$ и 100 атм., в логарифмической шкале используем формулу линейной интерполяции

$$\frac{\lg(1000) - \lg(200)}{\lg(200) - \lg(100)} = \frac{1,13 - \gamma}{\gamma - 1,26}, \quad \frac{1 - \lg(2)}{\lg(2)} = \frac{1,13 - \gamma}{\gamma - 1,26}.$$

Решая полученное уравнение, найдем для показателя адиабаты значение $\gamma = 1,22$.

Опишем также схему определения значения адиабаты γ при заданном значении температуры воздуха за ударной волной $T_1 = 5\ 000$ °К по данным табл. 4.

Считая базовыми значения адиабаты при $T_1 = 3\ 630$ и $17\ 878$ °К, вычисляем значение адиабаты, используя формулу линейной интерполяции в логарифмической шкале:

$$\frac{\lg(17\ 878) - \lg(5\ 000)}{\lg(5\ 000) - \lg(3\ 630)} = \frac{1,13 - \gamma}{\gamma - 1,26}, \quad \gamma = 1,23.$$

Вариант 1

Задача 1. Определить скорость ударной волны D при температуре воздуха за ее фронтом $T_1 = 400$ °К.

Задача 2. Как зависит температура воздуха T_1 за ударной волной от перепада давления ΔP в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит массовая скорость u воздуха за ударной волной от перепада давления ΔP в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 2$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 7$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 200$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 2

Задача 1. Определить массовую скорость воздуха u за ударной волной при температуре воздуха за фронтом $T_1 = 3\,630$ °К.

Задача 2. Как зависит скорость ударной волны D от перепада давления ΔP в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит массовая скорость воздуха за ударной волной u от перепада давления ΔP в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 6$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 3$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,5$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 300$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 3

Задача 1. Определить плотность воздуха ρ_1 за УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 804$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается в три раза?

Задача 3. Как зависит скорость D УВ от перепада давления ΔP в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 8$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 4$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 3$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра воздушного взрыва $m = 120$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 4

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 500$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается в два раза?

Задача 3. Как зависит скорость D УВ от перепада давления ΔP в случае слабой УВ, т. е. при малом перепаде давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 5$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 3$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 150$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 5

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 400$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При какой температуре воздуха за фронтом УВ при прохождении УВ плотность воздуха повышается в три раза?

Задача 3. Как зависит массовая скорость воздуха u за фронтом УВ от температуры воздуха за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP температура воздуха за фронтом будет равна 500 °К?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,01$ атм.?

Задача 6. При каком перепаде давления ΔP УВ скорость фронта D равна 400 м/с?

Вариант 6

Задача 1. Определить скорость УВ D при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 400$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP массовая скорость воздуха за фронтом УВ u будет равна скорости звука в покоящемся воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от температуры воздуха за фронтом УВ T_1 в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость звука за фронтом УВ увеличится на 50 %?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в два раза?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра взрыва находится наблюдатель, если при взрыве $m = 2$ кг тротила продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 5 мс?

Вариант 7

Задача 1. Определить массовую скорость u УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 450$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP скорость фронта УВ D будет равна удвоенной скорости звука в покоем воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от плотности воздуха ρ_1 за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость движения УВ увеличится на 50 %?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в три раза?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра взрыва находится наблюдатель, если при взрыве $m = 3$ кг тротила продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 3 мс?

Вариант 8

Задача 1. Определить скорость ударной волны D при температуре воздуха за фронтом $T_1 = 340$ °К.

Задача 2. Как зависит перепад давления ΔP от температуры воздуха T_1 за ударной волной в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от массовой скорости воздуха u за ударной волной в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 3$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 8$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 250$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 9

Задача 1. Определить массовую скорость воздуха u за ударной волной при температуре воздуха за фронтом $T_1 = 17\ 878$ °К.

Задача 2. Как зависит перепад давления ΔP от скорости ударной волны D в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от массовой скорости воздуха u за ударной волной в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 8$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 4$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 300$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 10

Задача 1. Определить плотность воздуха ρ_1 за УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 3\ 630$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается в 2,5 раза?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от скорости УВ D в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 10$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 3$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра воздушного взрыва $m = 120$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 11

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 650$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается на 50 %?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от скорости D УВ в случае слабой УВ, т. е. при малом перепаде давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 6$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 180$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 12

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 340$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При какой температуре воздуха за фронтом УВ при прохождении УВ плотность воздуха повышается на 30 %?

Задача 3. Как зависит температура воздуха T_1 за фронтом УВ от массовой скорости воздуха u за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP температура воздуха за фронтом будет равна 550 °К?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,02$ атм.?

Задача 6. При каком перепаде давления УВ ΔP скорость ее фронта D равна 400 м/с?

Вариант 13

Задача 1. Определить скорость УВ D при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 500$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP массовая скорость воздуха u за фронтом УВ будет равна скорости звука в покоящемся воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит температура воздуха T_1 за фронтом УВ от перепада давления ΔP в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость звука за фронтом УВ увеличится на 30 %?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в три раза?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра взрыва находится наблюдатель, если при взрыве $m = 3$ кг тротила продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 6 мс?

Вариант 14

Задача 1. Определить массовую скорость u УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 430$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP скорость фронта УВ D будет на 30 % больше скорости звука в покоящемся воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от плотности воздуха ρ_1 за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость движения УВ D на 40 % больше скорости звука ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в 5 раз?

Задача 6. Какое количество m ВВ было взорвано, если на расстоянии $r = 10$ м от эпицентра взрыва продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 3 мс?

Вариант 15

Задача 1. Определить скорость ударной волны D при температуре воздуха за фронтом $T_1 = 320$ °К.

Задача 2. Как зависит перепад давления ΔP от температуры воздуха T_1 за ударной волной в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от массовой скорости воздуха u за ударной волной в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 3$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 4$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 8$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 220$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 16

Задача 1. Определить массовую скорость воздуха u за ударной волной при температуре воздуха за фронтом $T_1 = 3630$ °К.

Задача 2. Как зависит перепад давления ΔP от скорости ударной волны D в случае слабой УВ?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от массовой скорости воздуха u за ударной волной в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 10$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 3$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 4$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 280$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 17

Задача 1. Определить плотность воздуха ρ_1 за УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 460$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается в 1,5 раза?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от скорости УВ D в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 11$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 4$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,2$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра воздушного взрыва $m = 130$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 18

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 480$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP при прохождении УВ плотность воздуха повышается на 60 %?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от скорости УВ D в случае слабой УВ, т. е. при малом перепаде давления?

Задача 4. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 8$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 5$ атм.?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,1$ атм.?

Задача 6. На каком расстоянии от эпицентра воздушного взрыва $m = 130$ кг тротила сильная УВ становится слабой?

Вариант 19

Задача 1. Определить плотность воздуха за ударной волной ρ_1 при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 310$ °К. Плотность воздуха перед УВ $\rho_0 = 1,225$ кг/м³.

Задача 2. При какой температуре воздуха за фронтом УВ при прохождении УВ плотность воздуха повышается на 25 %?

Задача 3. Как зависит температура воздуха T_1 за фронтом УВ от массовой скорости воздуха u за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP температура воздуха за фронтом будет равна 530 °К?

Задача 5. Какое количество m тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии $r = 5$ м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления $\Delta P = 0,015$ атм.?

Задача 6. При каком перепаде давления ΔP УВ скорость фронта D равна 420 м/с?

Вариант 20

Задача 1. Определить скорость УВ D при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 530$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP массовая скорость воздуха u за фронтом УВ совпадает со скоростью звука в покоящемся воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит температура воздуха T_1 за фронтом УВ от перепада давления ΔP в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость звука за фронтом УВ увеличится на 25 %?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в 6 раз?

Задача 6. На каком расстоянии r от эпицентра взрыва находится наблюдатель, если при взрыве $m = 5$ кг тротила продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 5 мс?

Вариант 21

Задача 1. Определить массовую скорость u УВ при температуре воздуха за фронтом УВ $T_1 = 410$ °К.

Задача 2. При каком перепаде давления ΔP скорость фронта УВ D будет на 25 % больше скорости звука в покоящемся воздухе ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 3. Как зависит перепад давления ΔP от плотности воздуха ρ_1 за фронтом УВ в случае слабой УВ?

Задача 4. При каком перепаде давления ΔP скорость движения УВ D на 30 % больше скорости звука ($c_0 = 340$ м/с)?

Задача 5. На сколько процентов увеличится удельный импульс, если вес ВВ m увеличить в 6 раз?

Задача 6. Какое количество ВВ m было взорвано, если на расстоянии $r = 20$ м от эпицентра взрыва продолжительность действия перепада давления τ^+ была равна 4 мс?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от массы взорванного ВВ и расстояния от эпицентра взрыва ударные волны подразделяются на сильные и слабые, с соответствующими асимптотиками. Кроме того, при значительном перепаде давления из-за разрушения структуры молекул воздуха наблюдается уменьшение показателя адиабаты, которое необходимо учитывать в расчетах.

В учебно-методическом пособии описаны характеристики воздушной ударной волны, возникающей при воздушном или наземном взрыве фугасного боеприпаса, в частности, приведены зависимости плотности и температуры за ударной волной как функции перепада давления. Приведены формулы, позволяющие рассчитывать перепад давления в ударной волне в зависимости от веса взорванного ВВ и расстояния от эпицентра взрыва. Рассмотрены методы расчетов характеристик ударной волны с примерами решения типичных задач, приведены варианты РГР для самостоятельного решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палымский И. Б. Оценка эффективности осколочно-фугасных боеприпасов // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 8 : Национальная конф. с междунар. участием «СибОптика-2023. Актуальные вопросы высокотехнологических отраслей». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 2. – С. 164–176.
2. Тяжелая артиллерия Советского периода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.xliby.ru/transport_i_aviacija/tehnika_i_vooruzhenie_1999_01/p10.php (дата обращения 02.04.2024).
3. Взрывы газопровода в Гаосюне (2014) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ru.wikipedia.org (дата обращения 02.04.2024).
4. Балаганский И. А., Мержиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов : учеб. пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 408 с.
5. Определение параметров воздушной ударной волны : метод. указания к лабораторной работе / Е. А. Знаменский, В. О. Кравцов, Б. Э. Кэрт, Н. П. Михайлов. – СПб. : БГТУ, 2018. – 27 с.

Учебное издание

Палымский Игорь Борисович

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Редактор *О. В. Георгиевская*

Компьютерная верстка *Ю. С. Мерзликиной*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 17.09.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,21. Тираж 90 экз. Заказ 114.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

