

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

И. Б. Палымский

# **ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ 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 Эффективность и надежность средств поражения : учебно-методическое пособие / И. Б. Палымский. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – 39 с. – Текст : непосредственный.  
ISBN 978-5-907711-89-1

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

Приведены основные соотношения, используемые для расчетов характеристик падающей и отраженной ударных волн при взрыве в воздухе. Приводятся примеры решений типовых задач по расчету характеристик отраженных ударных волн, для самостоятельного решения предложены варианты расчетно-графических работ.

Учебное пособие по дисциплине «Эффективность и надежность 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 оптических технологий СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 623.4

ISBN 978-5-907711-89-1

© СГУГиТ, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Взрыв фугасного боеприпаса в замкнутом пространстве .....	5
1.1. Обзор физических явлений в воздухе при воздушном взрыве.....	5
1.2. Определение параметров воздушной ударной волны.....	6
1.3. Образование стоячей звуковой волны.....	11
1.4. Характеристики ударной волны в замкнутом пространстве .....	13
2. Решение прямой и обратной задач при расчете характеристик взрыва фугасного боеприпаса в замкнутом пространстве .....	19
2.1. Решение прямой задачи .....	19
2.2. Решение обратной задачи .....	20
2.3. Примеры решений прямой и обратной задач.....	21
2.4. Расчетно-графическая работа «Взрыв фугасного боеприпаса в замкнутом пространстве».....	26
Заключение .....	37
Библиографический список.....	38

## **ВВЕДЕНИЕ**

Вплоть до настоящего времени осколочно-фугасные боеприпасы являются основным видом состоящих на вооружении боеприпасов [1, 2, 4]. Поражающее действие таких боеприпасов обеспечивается, во-первых, формирующимся при взрыве разрывного заряда осколочным полем и, во-вторых, фугасным действием проходящей по среде ударной волны [3]. В контексте учебно-методического пособия основной интерес представляет взрыв боеприпасов крупного калибра, для которых поражение ударной волной является основным.

В пособии описываются характеристики воздушной ударной волны, возникающей при воздушном взрыве фугасного боеприпаса, приводятся соотношения, позволяющие учесть эффект усиления поражающего действия боеприпаса благодаря наличию ограничивающих область взрыва жестких стенок. Описываются методы расчетов характеристик ударной волны с примерами решения типичных задач, приведены варианты расчетно-графических работ (РГР) для самостоятельного решения.

# 1. ВЗРЫВ ФУГАСНОГО БОЕПРИПАСА В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

## 1.1. Обзор физических явлений в воздухе при воздушном взрыве

В контексте пособия наиболее важными представляются характеристики ударной волны (УВ) как основного поражающего фактора при подрыве фугасного боеприпаса (ФБ), поэтому лишь кратко опишем наблюдающиеся при воздушном взрыве ФБ физические процессы, за деталями отсылая к [4].

Образующиеся в результате взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (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» принимает значения порядка  $10^3$  атм., а вглубь ПВ с их внешней поверхности со скоростью, равной местной скорости звука, начинает распространяться волна разрежения (ВР).

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 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. Однако 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 там вследствие инерционности движения 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 меньше атмосферного.

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.

## 1.2. Определение параметров воздушной ударной волны

Обозначая индексом 0 все величины перед ударной волной, а индексом 1 – соответствующие величины после прохождения ударной волны, кратко опишем формулы для расчета характеристик ударной волны при взрыве в воздухе. В этом случае в общих формулах полагается  $P_0 = 1$  атм.,  $P_1 = 1 + \Delta P_1$ ,  $\rho_0 = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> и  $T_0 = 288$ К. Полученные формулы можно применять до перепадов давления, равных нескольким десяткам атмосфер, но здесь надо иметь в виду, что по мере увеличения перепада давления точность используемых формул понижается из-за ионизации и диссоциации молекул воздуха. При расчете экстремально сильных УВ становится необходимым учет зависимости показателя адиабаты  $\gamma$  от перепада давления (таблица). Более подробный вывод формул, используемых для расчета воздушных ударных волн, можно найти в [4].

Показатель адиабаты как функция перепада давления

$\Delta P$ , атм.	$T_1$ , °К	$\gamma$	$\Delta P$ , атм.	$T_1$ , °К	$\gamma$
0,01	289	1,4	10,0	804	1,39
0,10	296	1,4	100	3630	1,26
1,00	354	1,4	1 000	17 878	1,13

Как следует из соотношений на ударных волнах в газе, плотность за ударной волной  $\rho_1$  может быть выражена через перепад давления за ударной волной  $\Delta P_1$  по формуле

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P_1}{2\gamma + (\gamma - 1) \Delta P_1}. \quad (1)$$

Устремляя перепад давления  $\Delta P_1$  к бесконечности (экстремально сильная ударная волна), из формулы (1) можно получить, что максимально возможная степень сжатия воздуха при прохождении ударной волны определяется величиной адиабаты  $\gamma$

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

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

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \cdot \Delta P_1}{7 + \Delta P_1}. \quad (3)$$

Для скорости ударной волны  $D_1$  справедливо соотношение

$$D_1 = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \Delta P_1}, \quad c_0 = 340 \text{ м / с}, \quad (4)$$

где  $c_0$  есть скорость звука в покоящемся воздухе.

Из формулы (4) для скорости ударной волны при взрыве в воздухе находим

$$D_1 = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P_1}. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) видно, что скорость ударной волны  $D_1$  всегда больше скорости звука в покоящемся воздухе  $c_0 = 340$  м/с.

Массовую скорость воздуха за ударной волной можно вычислить как

$$u_1 = \frac{\Delta P_1}{\rho_0 D_1}, \quad u_1 = \frac{1,28 \Delta P_1}{\sqrt{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P_1}}. \quad (6)$$

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

Из (6) получим соотношение для массовой скорости ударной волны при взрыве в воздухе

$$u_1 = 243 \cdot \frac{\Delta P_1}{\sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P_1}}. \quad (7)$$

Для температуры воздуха за фронтом ударной волны справедливо соотношение

$$T_1 = (1 + \Delta P_1) \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1} \cdot T_0, \quad T_1 = 288 \cdot \frac{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P_1}{2\gamma + (\gamma - 1) \Delta P_1} \cdot (1 + \Delta P_1). \quad (8)$$

Из (8) следует соотношение для температуры за фронтом ударной волны при воздушном взрыве

$$T_1 = 288 \cdot \frac{(1 + \Delta P_1) \cdot (7 + \Delta P_1)}{7 + 6 \cdot \Delta P_1}. \quad (9)$$

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

$$c_1 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P_1}{2\gamma + (\gamma - 1) \Delta P_1} \cdot (1 + \Delta P_1)}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) при  $\gamma = 1,4$  получаем выражение для значения скорости звука за фронтом ударной волны при взрыве в воздухе

$$c_1 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{(1 + \Delta P_1) \cdot (7 + \Delta P_1)}{7 + 6 \cdot \Delta P_1}}, \quad c_0 = 340 \text{ м / с}. \quad (11)$$

Еще раз подчеркнем, что формулы (3), (5), (7), (9) и (11) справедливы для умеренно сильных УВ с перепадами давления до нескольких десятков атмосфер, когда разрушение структуры молекул воздуха еще не стало



определяющим и можно считать приближенно  $\gamma = 1,4$ . При экстремально больших перепадах давления УВ разрушение структуры молекул воздуха обуславливает протекание процессов диссоциации и ионизации, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты  $\gamma$  (см. таблицу). Расчет характеристик таких УВ (при перепадах давления равных сотням и тысячам атмосфер) следует проводить по более полным формулам (1), (4), (6), (8) и (10) с учетом эффективного значения адиабаты  $\gamma$ , которое вычисляется по данным таблицы. 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 какими угодно большими (это определяется количеством ВВ), а увеличение плотности при этом лимитируется значением показателя адиабаты согласно формуле (2).

Как уже отмечалось выше, главным поражающим фактором фугасных боеприпасов большого калибра 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  $\Delta P_1$ , массу взорванного заряда тротила  $m$  и расстояние от эпицентра взрыва до точки наблюдения  $r$  при наземном взрыве (рис. 1)

$$\Delta P_1 = 0,95 \cdot x + 3,9 \cdot x^2 + 13 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (12)$$

Формула Садовского (12) описывает наземный взрыв тротила без металлической оболочки (удельная теплота взрыва  $Q = 4,1$  МДж/кг) при нормальных атмосферных условиях ( $P_0 = 1$  атм.). Формула (12) получена для сильных ударных волн, когда вес ВВ превышает 100 кг.

Для сильных ударных волн ( $\Delta P_1 \gg 1$  атм.) можно пользоваться асимптотической зависимостью

$$\Delta P_1 = 13 \cdot x^3, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (13)$$

Асимптотика для слабых ударных волн ( $\Delta P_1 \ll 1$  атм.) линейная:

$$\Delta P_1 = 0,95 \cdot x, \quad x = \sqrt[3]{m} / r. \quad (14)$$

Асимптотики, построенные для сильных (13) и слабых (14) ударных волн, показаны на рис. 1 штриховой и штрих-пунктирной линиями соответственно. Примерная граница областей, где данные асимптотики справедливы (верхняя граница для слабой УВ и нижняя для сильной, закрашенный кружок соответствует  $\Delta P_1 \approx 1$  атм.) показана тонкой сплошной вертикальной линией. Сплошной линией показана зависимость (12).

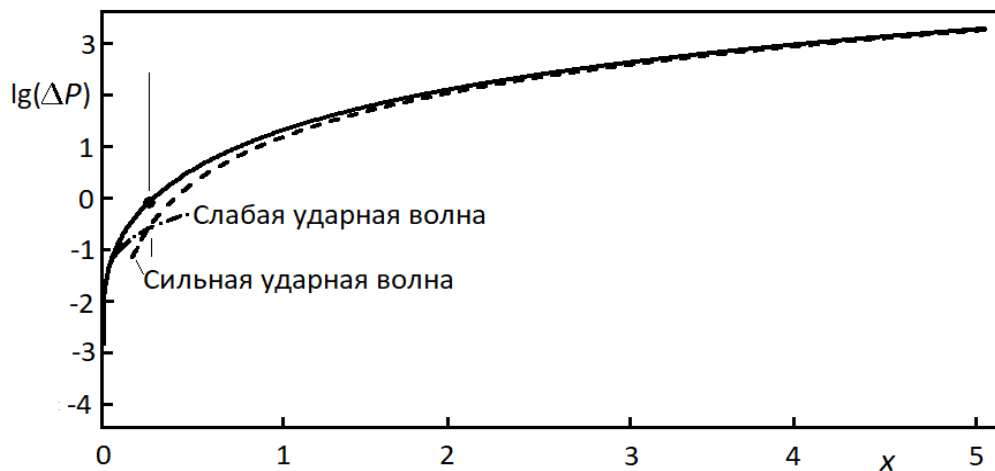


Рис. 1. Перепад давления при наземном взрыве

Если  $\Delta P_1 \ll 1$  атм., то используется асимптотика (14), а если  $\Delta P_1 \gg 1$  атм., то (13).

При расчете характеристик ударных волн средней интенсивности ( $\Delta P_1 \sim 1$  атм.) следует пользоваться полным уравнением (12). Сначала по

заданному значению  $\Delta P_1$  с графической точностью по рис. 1 определяется соответствующее начальное приближение для  $x$ , которое затем уточняется методом Ньютона или простым подбором. Значению  $\Delta P_1 = 1$  атм. на рис. 1 соответствует  $x = 0,3$ .

### 1.3. Образование стоячей звуковой волны

Для начала рассмотрим, как в результате взаимодействия (интерференции) слабой падающей и отраженной звуковых волн формируется стоячая волна. В контексте данной работы здесь наиболее важным представляется механизм увеличения амплитуды результирующей стоячей волны, возникающей в результате сложения падающей и отраженной волн.

Стоячая волна – это волна, возникающая в результате наложения двух когерентных бегущих волн, имеющих одинаковую амплитуду и распространяющихся навстречу друг другу.

Типичный пример стоячей волны – поперечные колебания струн музыкальных инструментов; также стоячая волна может возникать в ограниченном твердыми стенками воздушном промежутке.

Для создания стоячей волны в воздухе достаточно иметь источник колебаний и поверхность раздела двух сред в виде жесткой стенки. Тогда волна, отраженная от поверхности раздела, распространяется навстречу падающей волне и накладывается на нее.

Из курса физики известно, что если волна отражается от жесткой стенки, которая препятствует колебаниям частиц среды, контактирующих с ней, то на поверхности раздела сред возникает узел, где колебания отсутствуют. Фазы падающей и отраженной волн отличаются при этом на  $\pi$ . Ввиду бесконечно малой амплитуды звуковых колебаний можно считать, что форма рассматриваемых бегущих волн описывается гармоническими функциями через косинусы либо синусы.

В этом случае стоячая волна (выражение в правой части нижеприведенной формулы) образуется в результате интерференции падающей (первое слагаемое) и отраженной (второе слагаемое левой части нижеприведенной

формулы, где знак перед  $x$  изменен, так как отраженная волна движется в обратном направлении) встречных незатухающих плоских бегущих волн, распространяющихся вдоль направления  $x$ :

$$A \cos(\omega t - 2\pi x / \lambda) + A \cos(\omega t + 2\pi x / \lambda + \pi) = 2A \sin(\omega t) \sin(2\pi x / \lambda). \quad (15)$$

При выводе уравнения стоячей волны были использованы формула для суммы двух косинусов с различными аргументами

$$A \cos(\alpha) + A \cos(\beta) = 2A \cos((\alpha + \beta) / 2) \cdot \cos((\alpha - \beta) / 2)$$

и формула приведения

$$\cos(\alpha + \pi / 2) = -\sin(\alpha).$$

В формуле (15)  $\omega = 2\pi/T$  есть циклическая частота, определенная через период колебаний  $T$ , а  $\lambda$  – длина волны падающей и отраженной волн.

Выражение в правой части формулы (15) показывает, что амплитуда стоячей волны зависит от координаты  $x$  и описывается выражением

$$2A |\sin(2\pi x / \lambda)|. \quad (16)$$

Считая, что левая жесткая граница воздушного промежутка соответствует  $x = 0$ , правая –  $x = \ell$  и учитывая, что амплитуда колебаний на жестких стенках равна нулю, находим ограничение на длину волны  $\lambda$  в виде

$$\frac{2\pi \ell}{\lambda} = n\pi, \quad \ell = n \frac{\lambda}{2}, \quad \lambda = 2 \frac{\ell}{n}.$$

Из приведенных соотношений видно, что протяженность воздушного промежутка  $\ell$  и длина падающей волны  $\lambda$  не могут быть выбраны произвольно, а именно, в промежутке между жесткими границами должно укладываться целое число  $n$  полуволн.

Из выражения для амплитуды стоячей волны (16) следует, что в точках

$$x_n = \left(\frac{1}{2} + n\right) \frac{\lambda}{2}$$

амплитуда стоячей волны

$$2A |\sin(2\pi x / \lambda)| = 2A,$$

т. е. удваивается.

Таким образом, образование стоячей волны в результате интерференции падающей и отраженной звуковых волн при выполнении условий на длину волны приводит к образованию стоячей волны с удвоением амплитуды в некоторых точках области.

#### **1.4. Характеристики ударной волны в замкнутом пространстве**

При боевом применении боеприпасов иногда наблюдаются случаи их взрыва в замкнутом объеме, например, взрыв снаряда внутри самолета после пробития обшивки; взрыв авиабомбы внутри сооружения, здания, корабля; детонация облака топливно-воздушной смеси, затекшей внутрь сооружения [3], и т. п. При этом ударная волна взрыва многократно переотражается от стенок объема, в результате чего воздействие взрыва на элементы конструкции оказывается существенно большим, чем при взрыве такого же заряда вне замкнутого объема на таком же расстоянии. Разрушающее действие взрыва в замкнутом объеме в ряде случаев существенно превосходит действие взрыва в открытой среде [4].

Для оценки разрушающего действия УВ в замкнутом пространстве необходимо знать давление, оказываемое волной на преграду. Величина этого давления в ряде случаев значительно превосходит определяемое по формуле Садовского (12) давление  $\Delta p_1$ . Это объясняется тем, что при встрече с преградой происходит резкое торможение движущихся вслед за УВ сжатых масс воздуха. В результате этого, кроме давления, которое в момент встречи с преградой имел сам воздух, сжатый на фронте УВ (статическая составляющая давления  $\Delta p_1$ ), на преграду будет действовать

дополнительное давление, обусловленное скоростным напором воздуха (динамическая составляющая давления  $\Delta p_1$ ).

Возникающий при этом перепад давлений начнет самостоятельно распространяться в виде отраженной ударной волны (ОУВ), причем в воздухе, уже предварительно сжатом набегающей волной. При этом ОУВ будет двигаться в обратном направлении по отношению к падающей УВ.

Будем считать, что плоская абсолютно жесткая стенка бесконечных размеров перпендикулярна направлению движения фронта волны, что соответствует случаю так называемого нормального отражения.

Проводя теоретические рассуждения, для величины скачка давления, отраженного от жесткой стенки волны, можно получить

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \Delta p_1^2}{\frac{2\gamma p_0}{\gamma - 1} + \Delta p_1}. \quad (17)$$

Здесь  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  – скачки давления падающей и отраженной волн.

Полагая в приведенном равенстве  $p_0 = 1$  атм. и  $\gamma = 1,4$ , для скачка давления отраженной волны в воздухе находим

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{6 \cdot \Delta p_1^2}{7 + \Delta p_1}. \quad (18)$$

Использование метода малого параметра (как в подразд. 2.3) позволяет получить из (18) асимптотические выражения, справедливые для малого ( $\Delta p_1 \ll 1$  атм., слабая падающая волна) и большого ( $\Delta p_1 \gg 1$  атм., сильная) перепадов давления падающей волны

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= 2\Delta p_1, & \Delta p_1 &\ll 1, \\ \Delta p_2 &= 8\Delta p_1 - 42, & \Delta p_1 &\gg 1. \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, при слабой падающей волне наблюдается ожидаемое удвоение перепада давления (подразд. 1.3); при сильной перепад давления

может быть восьмикратным. В этой связи отметим, что полученное значение не является окончательным, так как ввиду уменьшения показателя адиабаты при увеличении скачка давления падающей волны (см. таблицу) в отраженной волне скачок давления растет более существенно. Например, при перепаде давления в падающей волне порядка  $10^3$  атм. показатель адиабаты  $\gamma$  равен 1,1 и скачок давления в отраженной волне, как это можно видеть из формулы (18), в 23 раза превосходит скачок давления в падающей волне.

Приравнивая выражения для асимптотик, справедливых для слабого и сильного значений перепадов давления в падающей волне (19), найдем приближенное значение величины перепада давления падающей волны, которое разделяет области слабой и сильной ударных волн:

$$2\Delta p_1 = 8\Delta p_1 - 42, \quad \Delta p_1 = 7.$$

Конечно, полученное значение  $\Delta p_1 = 7$  атм. дает только порядковую оценку и является очень приближенным.

На рис. 2 изображен скачок давления в отраженной волне как функция величины скачка давления в падающей волне, сплошной линией показана зависимость (18), а штрихпунктирной и пунктирной – асимптотические зависимости (19) для слабой и сильной падающих волн соответственно. Можно видеть, что асимптотику слабой УВ можно использовать при  $\Delta P_1 < 1$  атм., сильной – при  $\Delta P_1 > 15$  атм., а при  $1 \leq \Delta P_1 \leq 15$  следует использовать общее выражение (18). Для расчета экстремально сильных УВ следует использовать соотношение (17) и таблицу.

После определения величины скачка давления в отраженной волне по известному скачку давления определяются все остальные величины, причем здесь справедливы те же формулы, что и для падающей волны.

Для определения значения плотности за ударной волной имеем соотношение

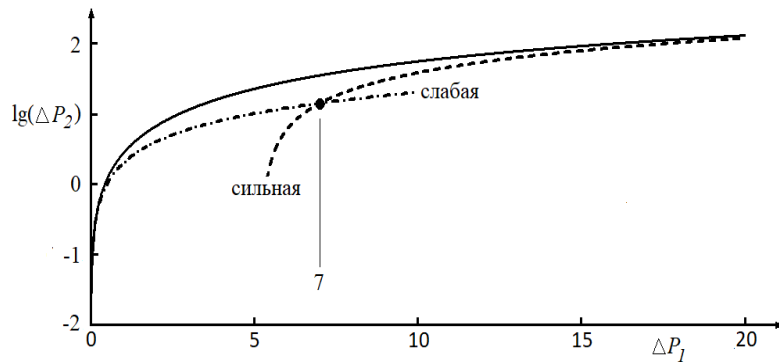


Рис. 2. Перепад давления отраженной УВ как функция перепада давления падающей УВ

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P_2}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P_2}. \quad (20)$$

Устремляя перепад давления  $\Delta P_2$  к бесконечности (экстремально сильная ударная волна), из формулы (20) можно получить максимально возможную степень сжатия воздуха отраженной ударной волной, определяемой величиной адиабаты  $\gamma$

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}. \quad (21)$$

Из формулы (21) видно, что максимальная степень сжатия не зависит от силы и количества падающих и отраженных ударных волн, а определяется только значением адиабаты  $\gamma$ .

Для взрыва в воздухе для УВ (при  $\gamma = 1,4$ ) из (20) получим

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \cdot \Delta P_2}{7 + \Delta P_2}. \quad (22)$$

Для скорости отраженной ударной волны  $D_2$  справедливо соотношение

$$D_2 = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \Delta P_2}, \quad c_0 = 340 \text{ м/с}, \quad (23)$$



где  $c_0$  есть скорость звука в покоем воздухе перед фронтом падающей волны.

Из формулы (23) для скорости отраженной ударной волны при взрыве в воздухе ( $\gamma = 1,4$ ) находим

$$D_2 = 340 \cdot \sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P_2}. \quad (24)$$

Из формул (23), (24) и (4), (5) видно, что скорость отраженной ударной волны  $D_2$ , как и скорость падающей ударной волны  $D_1$ , всегда больше скорости звука  $c_0$  в покоем воздухе.

Массовая скорость воздуха за отраженной ударной волной определяется соотношением

$$u_2 = \frac{\Delta P_2}{\rho_0 D_2}, \quad u_2 = \frac{1,28 \Delta P_2}{\sqrt{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P_2}}. \quad (25)$$

Массовая скорость воздуха перед фронтом падающей ударной волны равна 0, а за ее фронтом и перед фронтом отраженной УВ –  $u_1$ .

Из (25) можно получить соотношение для массовой скорости отраженной ударной волны при взрыве в воздухе

$$u_2 = 243 \cdot \frac{\Delta P_2}{\sqrt{1 + 0,86 \cdot \Delta P_2}}. \quad (26)$$

Для температуры воздуха за фронтом отраженной ударной волны справедливо соотношение

$$T_2 = (1 + \Delta P_2) \cdot \frac{\rho_0}{\rho_2} \cdot T_0, \quad T_2 = 288 \cdot \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\Delta P_2}{2\gamma + (\gamma - 1)\Delta P_2} \cdot (1 + \Delta P_2). \quad (27)$$

Из (27) следует соотношение для температуры за фронтом отраженной ударной волны при воздушном взрыве

$$T_2 = 288 \cdot \frac{(1 + \Delta P_2) \cdot (7 + \Delta P_2)}{7 + 6 \cdot \Delta P_2}. \quad (28)$$

Последовательный нагрев массы воздуха падающей и отраженной ударными волнами постепенно приводит к увеличению значения скорости звука сначала за фронтом падающей ударной волны, а затем и отраженной:

$$c_2 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{2\gamma + (\gamma + 1) \Delta P_2}{2\gamma + (\gamma - 1) \Delta P_2} \cdot (1 + \Delta P_2)}. \quad (29)$$

Из соотношения (29), справедливого для УВ произвольной интенсивности, получаем выражение для значения скорости звука за фронтом отраженной ударной волны при воздушном взрыве при  $\gamma = 1,4$

$$c_2 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{(1 + \Delta P_2) \cdot (7 + \Delta P_2)}{7 + 6 \cdot \Delta P_2}}, \quad c_0 = 340 \text{ м/с}. \quad (30)$$

Подчеркнем, что формулы (22), (24), (26), (28) и (30) приведены и справедливы для воздушного взрыва при перепадах давления до нескольких десятков атмосфер, когда разрушение структуры молекул воздуха еще не стало определяющим и приближенно равно  $\gamma = 1,4$ . В случае более сильной УВ неизбежно происходящее при этом разрушение структуры молекул воздуха обуславливает протекание процессов диссоциации и ионизации, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты  $\gamma$  (см. таблицу). Расчет характеристик экстремально сильных ударных волн (перепады давления измеряются сотнями и тысячами атмосфер) следует проводить по более полным формулам (20), (23), (25), (27) и (29) с учетом эффективного значения адиабаты  $\gamma$ , которое вычисляется по данным таблицы по известному перепаду давления или температуре за ударной волной.

Еще раз подчеркнем важнейшую особенность ударных волн, которая заключается в том, что давление и температура воздуха за фронтом падающей и отраженной ударных волн могут принимать какие угодно большие значения (это определяется количеством ВВ), а увеличение плотности при этом лимитируется значением показателя адиабаты согласно формуле (21).

## 2. РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВА ФУГАСНОГО БОЕПРИПАСА В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### 2.1. Решение прямой задачи

При решении прямой задачи определяются характеристики отраженной УВ, причем считается, что соответствующие характеристики падающей волны известны или могут быть определены.

В этом случае решение прямой задачи разбивается на два этапа: сначала определяется перепад давления отраженной ударной волны  $\Delta P_2$  по заданным характеристикам падающей волны, а затем подлежат определению по формулам предыдущего раздела искомые параметры отраженной волны. Если при этом перепад давления отраженной волны получается экстремально большим, то для расчета характеристик отраженной волны необходимо использовать общие формулы с учетом данных таблицы.

В частности, по заданному перепаду давления отраженной волны вычисляется (i) плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны по формулам (20) и (22), (ii) скорость ударной волны  $D_2$  (23) и (24), (iii) массовая скорость воздуха за ударной волной  $u_2$  (25) и (26), (iv) температура воздуха за ударной волной  $T_2$  (27) и (28), (v) скорость звука за фронтом ударной волны  $c_2$  (29) и (30).

Прямой подстановкой в формулы (12), (13) или (14) заданных значений массы взорванного тротила  $m$  и расстояния от эпицентра взрыва  $r$  вычисляется перепад давления  $\Delta P_1$  при наземном подрыве боеприпаса, затем по формулам (19) (для слабой или сильной УВ) или (18) (в общем случае) вычисляется перепад давления отраженной УВ и затем все характеристики отраженной УВ, которые требуется определить.

## 2.2. Решение обратной задачи

При решении обратной задачи считается, что параметры отраженной ударной волны известны или могут быть вычислены, а характеристики падающей волны подлежат определению.

Отметим, что решение обратной задачи, как правило, сложнее, чем прямой, так как получаемые здесь фактически новые соотношения можно рассматривать как неявные или обратные функции.

Для примера покажем, как из соотношения (22) определить перепад давления падающей УВ при известных значениях плотности покоящегося воздуха  $\rho_0$  и за фронтом отраженной волны  $\rho_2$ . Падающая волна считается (i) слабой или (ii) сильной.

Итак, соотношение (22) имеет вид

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \Delta P_2}{7 + \Delta P_2}.$$

Выражая отсюда перепад давления  $\Delta P_2$  в отраженной волне, находим

$$\Delta P_2 = \frac{7(\rho_2 - \rho_0)}{6\rho_0 - \rho_2}. \quad (31)$$

Можно видеть, что искомый перепад давления из соотношения (31) не может быть найден, если знаменатель выражения (31) равен нулю:

$$6\rho_0 - \rho_2 = 0, \quad \rho_2 = 6\rho_0.$$

Или определение перепада давления в отраженной волне из формулы (22) не представляется возможным при задании предельно большого перепада плотности в УВ.

Теперь, учитывая первое в (19) соотношение для слабой ударной волны, из (31) получаем выражение для скачка давления падающей волны

$$\Delta P_1 = \frac{3,5(\rho_2 - \rho_0)}{6\rho_0 - \rho_2}.$$

Учитывая второе в (19) соотношение для сильной ударной волны, из (31) получаем выражение для скачка давления падающей волны

$$\Delta P_1 = \frac{7(\rho_2 - \rho_0)}{8(6\rho_0 - \rho_2)} + 5,25.$$

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

Выше уже отмечалось, что соотношения сильно упрощаются в случаях слабой ( $\Delta P_1 \ll 1$  атм.) или сильной ( $\Delta P_1 \gg 1$  атм.) падающих ударных волн, так как при этом получаются наиболее простые формулы.

При рассмотрении примеров и решении задач мы ограничиваемся рассмотрением характеристик УВ при перепадах давления до нескольких десятков атмосфер, когда значение показателя адиабаты  $\gamma$  приближенно равно 1,4 и разрушение структуры молекул воздуха еще не стало определяющим. В противном случае при экстремально больших перепадах давления неизбежно возникающее разрушение структуры молекул воздуха запускает в воздушной среде процессы диссоциации и ионизации молекул воздуха, что приводит к уменьшению эффективного значения показателя адиабаты  $\gamma$ , значения которого следует вычислять по данным таблицы.

При расчете характеристик слабых и сильных УВ широко используется один из самых эффективных методов приближенных вычислений – метод малого параметра. В данном случае малым может быть 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; 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 с большим параметром приводятся к выражениям с малым параметром, которые затем рассматриваются с использованием приведенных выше формул.

При расчете перепада давления ударных волн при наземном взрыве средней интенсивности (при  $\Delta P_1 \sim 1$  атм.) следует пользоваться полным уравнением (12). Сначала по заданному значению  $\Delta P_1$  с графической точностью определяется соответствующее начальное приближение  $x$  по рис. 1, а затем это значение уточняется методом Ньютона или простым подбором.

При расчете перепада давления отраженной волны асимптотические разложения можно использовать в случае слабой УВ при  $\Delta P_1 < 1$  атм., в случае сильной – при  $\Delta P_1 > 15$  атм., а при  $1 < \Delta P_1 < 15$  атм. следует использовать общее квадратное алгебраическое уравнение (18).

Приведем несколько примеров решения характерных задач.

**Задача 1.** Определить плотность воздуха за отраженной УВ  $\rho_2$  при перепаде давления падающей УВ  $\Delta P_1 = 0,05$  атм. Плотность покоящегося воздуха  $\rho_0 = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>.

**Решение.**

Судя по заданному значению перепада давления падающей волны, УВ слабая, поэтому можно использовать верхнюю формулу из (19) для слабой УВ. Находим для перепада давления отраженной волны

$$\Delta P_2 = 2 \cdot 0,05 = 1 \text{ атм.}$$

Теперь по вычисленному перепаду  $\Delta P_2$  определяем плотность за фронтом отраженной УВ

$$\rho_2 = 1,225 \cdot \frac{7 + 6 \cdot 1}{7 + 1} = 2 \text{ кг/м}^3.$$

**Задача 2.** Как зависит плотность за отраженной ударной волной от перепада давления падающей ударной волны в случае слабой УВ?

**Решение.**

Используя формулу (22) для отраженной УВ, имеем для плотности  $\rho_2$  за ударной волной

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{7 + 6 \cdot \Delta P_2}{7 + \Delta P_2}, \quad \rho_2 = \rho_0 \cdot \left( \frac{1 + \frac{6}{7} \cdot \Delta P_2}{1 + \frac{1}{7} \cdot \Delta P_2} \right), \quad \rho_2 = \rho_0 \cdot \left( 1 + \frac{5}{7} \cdot \Delta P_2 \right).$$

Теперь, с учетом первой формулы из (19), имеем

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \left( 1 + \frac{5}{7} \cdot \Delta P_2 \right), \quad \Delta p_2 = 2 \cdot \Delta p_1, \quad \rho_2 = \rho_0 \cdot \left( 1 + \frac{10}{7} \cdot \Delta P_1 \right).$$

**Задача 3.** Как зависит температура воздуха за отраженной ударной волной от перепада давления падающей волны в случае сильной УВ?

**Решение.**

Учитывая в числителе и знаменателе формулы (28) члены с наибольшими степенями  $\Delta P_2$  и учитывая вторую формулу из (19) для сильной ударной волны, имеем для температуры за ударной волной

$$T_2 = 288 \cdot \frac{(1 + \Delta P_2) \cdot (7 + \Delta P_2)}{7 + 6 \cdot \Delta P_2} \approx 48 \cdot \Delta P_2, \quad \Delta P_2 = 8 \cdot \Delta P_1 - 42, \quad T_2 = 384 \cdot \Delta P_1 - 2016^0 \text{ К}.$$

**Задача 4.** Какое количество  $m$  тротила взорвали, если при воздушном взрыве на расстоянии  $r = 10$  м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления  $\Delta P_1 = 3$  атм.?

**Решение.**

УВ при заданном перепаде давления является сильной и поэтому можно применить асимптотическую формулу (13):

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

Отсюда последовательно находим

$$x = \sqrt[3]{3/7} = 0,613, \quad m = (0,613 \cdot 10)^3 \approx 231 \text{ кг.}$$

**Задача 5.** Какое количество  $m$  тротила взорвали, если при воздушном взрыве 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 (14):

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

Отсюда последовательно находим, что

$$x = 0,1 / 0,95 = 0,105, \quad m = (0,105 \cdot 5)^3 = 0,145 \text{ кг.}$$

**Задача 6.** При каком значении перепада давления  $\Delta P_1$  падающей ударной волны скорость перемещения отраженной УВ равна  $D_2 = 400$  м/с?

**Решение.**

Обращая формулу (24) для скорости отраженной УВ, определяем перепад давления отраженной волны

$$\Delta P_2 = \frac{(400 / 340)^2 - 1}{0,86} = 0,447 \text{ атм.}$$

Отраженная волна является слабой, поэтому из первого из соотношений (19) (асимптотика слабой УВ) находим перепад давления падающей волны



$$\Delta P_2 = 0,447 \text{ атм.}, \quad \Delta P_2 = 2 \cdot \Delta P_1, \quad \Delta P_1 = 0,224 \text{ атм.}$$

**Задача 7.** При каком значении перепада давления  $\Delta P_1$  падающей ударной волны скорость перемещения отраженной УВ  $D_2 = 2\,000$  м/с?

**Решение.**

Обращая формулу (24) для скорости отраженной УВ, определяем перепад давления отраженной волны

$$\Delta P_2 = \frac{(2\,000 / 340)^2 - 1}{0,86} = 39 \text{ атм.}$$

Отраженная волна сильная, поэтому из второго из соотношений (19) (асимптотика сильной УВ) находим перепад давления падающей волны

$$\Delta P_2 = 39, \quad \Delta P_2 = 8 \cdot \Delta P_1 - 42, \quad \Delta P_1 = 10,125 \text{ атм.}$$

**Задача 8.** При каком значении перепада давления  $\Delta P_1$  падающей ударной волны скорость перемещения отраженной УВ  $D_2 = 1\,000$  м/с?

**Решение.**

Обращая формулу (24) для скорости отраженной УВ, определяем перепад давления в отраженной волне

$$\Delta P_2 = \frac{(1\,000 / 340)^2 - 1}{0,86} = 8,9 \text{ атм.}$$

По данным на рис. 2 видно, что отраженная волна с таким перепадом давления не может считаться слабой или сильной. Поэтому соответствующий перепад давления падающей волны найдем из уравнения (18), решая его как квадратное относительно  $\Delta P_1$  и отбрасывая нефизический отрицательный корень:

$$8,9 = 2 \cdot \Delta P_1 + (6 \cdot \Delta P_1^2) / (7 + \Delta P_1), \quad \Delta P_1 = 2,5 \text{ атм.}$$

**Задача 9.** При каком значении перепада давления  $\Delta P_1$  падающей ударной волны перепад давления  $\Delta P_2$  отраженной ударной волны равен 7 атм.?

### **Решение.**

Обращая формулу (18) и решая полученное соотношение как квадратное уравнение относительно  $\Delta P_1$ , находим

$$7 = 2 \cdot \Delta P_1 + (6 \cdot \Delta P_1^2) / (7 + \Delta P_1), \quad \Delta P_1 = 2,076 \text{ атм.}$$

## **2.4. Расчетно-графическая работа «Взрыв фугасного боеприпаса в замкнутом пространстве»**

Здесь приведены варианты РГР по расчету характеристик отраженной ударной волны, образующейся при взаимодействии падающей УВ с жесткой стенкой. Каждый вариант РГР состоит из 6 задач, номер варианта должен совпадать с номером студента в списке группы.

### **Вариант 1**

**Задача 1.** Определить скорость отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ .

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей УВ волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна  $400 \text{ }^\circ\text{K}$ ?

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

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна  $10\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ ?

## Вариант 2

**Задача 1.** Определить скорость звука отраженной ударной волны  $c_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 320$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления отраженной ударной волны  $\Delta P_2$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления отраженной ударной волны  $\Delta P_2$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 10 000 °К?

**Задача 5.** Какое количество  $m$  тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии  $r = 2$  м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления  $\Delta P = 0,1$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 290 °К?

## Вариант 3

**Задача 1.** Определить скорость звука отраженной ударной волны  $c_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 320$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления отраженной ударной волны  $\Delta P_2$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления отраженной ударной волны  $\Delta P_2$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 10 000 °К?

**Задача 5.** Какое количество  $m$  тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии  $r = 2$  м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления  $\Delta P = 0,1$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 350 °К?

## Вариант 4

**Задача 1.** Определить температуру  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 320$  °К.

**Задача 2.** Как зависит температура воздуха  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 10 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления отраженной волны  $\Delta P_2$  соответствует перепад давления падающей волны  $\Delta P_1 = 7$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 330 °К?

## Вариант 5

**Задача 1.** Определить перепад давления  $\Delta P_2$  на фронте отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 12 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 5$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 310 °К?

## Вариант 6

**Задача 1.** Определить скорость фронта  $D_2$  отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 330$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 9 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 8$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура отраженной волны  $T_2$  соответствует перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1 = 7$  атм.?

## Вариант 7

**Задача 1.** Определить массовую скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 5 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 9$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад температуры  $T_2$  отраженной волны соответствует перепаду давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 6$  атм.?

## Вариант 8

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 6 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 7,5$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад температуры  $T_2$  отраженной волны соответствует перепаду давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 7$  атм.?

## Вариант 9

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 315$  °К.

**Задача 2.** Как зависит температура воздуха  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость  $D_2$  фронта отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 7 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 6,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура отраженной волны  $T_2$  соответствует перепаду давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 6$  атм.?

## Вариант 10

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 350$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость движения воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость  $D_2$  фронта отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 8 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 5,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура отраженной волны  $T_2$  соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 7$  атм.?

## Вариант 11

**Задача 1.** Определить скорость отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей УВ волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 420 °К?

**Задача 5.** Какое количество  $m$  тротила нужно заложить, чтобы при воздушном взрыве на расстоянии  $r = 1$  м от эпицентра взрыва УВ имела перепад давления  $\Delta P = 0,05$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 9 000 °К?

## Вариант 12

**Задача 1.** Определить скорость звука отраженной ударной волны  $c_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 330$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от ее перепада давления  $\Delta P_2$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от ее перепада давления  $\Delta P_2$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 11 000 °К?

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

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 310 °К?

## Вариант 13

**Задача 1.** Определить скорость звука отраженной ударной волны  $c_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 315$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от ее перепада давления  $\Delta P_2$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость  $u_2$  воздуха за фронтом отраженной ударной волны от ее перепада давления  $\Delta P_2$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 8 000 °К?

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

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 310 °К?



## Вариант 14

**Задача 1.** Определить температуру  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 330$  °К.

**Задача 2.** Как зависит температура воздуха  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 12 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 7$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 320 °К?

## Вариант 15

**Задача 1.** Определить перепад давления  $\Delta P_2$  на фронте отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 300$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ, т. е. при большом значении перепада давления?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 9 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 6$  атм.?

**Задача 6.** Какой перепад давления  $\Delta P_1$  должна иметь падающая волна, чтобы температура за фронтом отраженной волны  $T_2$  была равна 300 °К?

## Вариант 16

**Задача 1.** Определить скорость фронта  $D_2$  отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 320$  °К.

**Задача 2.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит плотность воздуха  $\rho_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 9 500 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 7,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура  $T_2$  отраженной волны соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 6$  атм.?

## Вариант 17

**Задача 1.** Определить массовую скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 315$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 7 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 8,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура отраженной волны  $T_2$  соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 5$  атм.?

## Вариант 18

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 300$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит массовая скорость воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 6 500 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 6,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура  $T_2$  отраженной волны соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 7$  атм.?

## Вариант 19

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит температура воздуха  $T_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость  $D_2$  фронта отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна 8 000 °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 5,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура  $T_2$  отраженной волны соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 5$  атм.?

## Вариант 20

**Задача 1.** Определить скорость движения фронта отраженной ударной волны  $D_2$  при температуре воздуха за фронтом падающей волны  $T_1 = 310$  °К.

**Задача 2.** Как зависит массовая скорость движения воздуха  $c_2$  за фронтом отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае слабой УВ?

**Задача 3.** Как зависит скорость  $D_2$  фронта отраженной ударной волны от перепада давления падающей ударной волны  $\Delta P_1$  в случае сильной УВ?

**Задача 4.** Какой перепад давления  $\Delta P_2$  должна иметь отраженная волна, чтобы температура за ее фронтом  $T_2$  была равна  $7\ 500$  °К?

**Задача 5.** Какому перепаду давления падающей волны  $\Delta P_1$  соответствует перепад давления отраженной волны  $\Delta P_2 = 4,5$  атм.?

**Задача 6.** Какая температура  $T_2$  отраженной волны соответствует ее перепаду давления  $\Delta P_2 = 4,3$  атм.?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При взрыве фугасных боеприпасов в замкнутых помещениях их поражающее действие значительно усиливается за счет взаимодействия падающих и отраженных от стенок ударных волн. Физически это связано с тем, что отраженная волна проходит по уже разогретой падающей ударной волной воздушной среде, причем эффект усиления поражающего действия фугасного боеприпаса проявляется сильнее с ростом его мощности из-за многократного переотражения УВ от жестких стенок.

В учебно-методическом пособии приведены формулы для расчета характеристик воздушной ударной волны и соотношения, отражающие усиление поражающего действия фугасного боеприпаса при его взрыве в замкнутых областях. Также приведены основные соотношения метода малого параметра, примеры решения типовых задач и 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 высокотехнологичных 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](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](http://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**

# **ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ**

*Редактор О. В. Георгиевская*

*Компьютерная верстка В. А. Рыжова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 05.12.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 2,26. Тираж 90 экз. Заказ 177.

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, 108, Плахотного, 8.