

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Бийский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

В.А. Беляев

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Методические рекомендации по проведению практических занятий
и организации самостоятельной работы студентов
специальности 17.05.01 – Боеприпасы и взрыватели

Бийск
Издательство Алтайского государственного технического университета
им. И.И. Ползунова
2021

Рецензент: И.Н. Сурначев, ведущий научный сотрудник, к.т.н. (АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск)

Беляев, В.А.

Б43 Основы проектирования средств поражения: Методические рекомендации по проведению практических занятий и организации самостоятельной работы студентов специальности 17.05.01 – Боеприпасы и взрыватели / В.А. Беляев. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2021. – 34 с.

В методических рекомендациях изложены методы решения задач проектирования боеприпасов и средств поражения, приведены основные сведения по вопросам функционирования боеприпасов и средств поражения, даны методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине.

УДК 623.45(076)

Методические рекомендации издаются в авторской редакции.

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры РДВУАС.
Протокол № 8 от 09 апреля 2021 г.

© Беляев В.А., 2021
© БТИ АлтГТУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов	5
Практическое занятие №1. Определение характеристик осколков осколочных боеприпасов..	7
Практическое занятие №2. Определение характеристик спектра осколков.....	10
Практическое занятие №3. Расчет параметров взрывных волн фугасных боеприпасов	13
Практическое занятие №4. Оценка могущества фугасных снарядов и мин.....	16
Практическое занятие №5. Инженерный метод расчета параметров функционирования кумулятивных зарядов.....	20
Практическое занятие №6. Расчет параметров функционирования элементов динамической защиты.....	25
Практическое Занятие №7. Инженерный метод расчета параметров функционирования снарядоформирующих зарядов	30
Список использованных источников.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Учебным планом специальности 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели» в рамках курса «Основы проектирования средств поражения» предусмотрены практические занятия. Данные методические рекомендации позволят помочь студенту приобрести навыки в решении задач проектирования боеприпасов и средств поражения.

Материал рекомендаций излагается в следующей последовательности. Сначала рассматривается содержание задач, которые требуется решить, а затем дается последовательность решения этих задач. Решение практических задач в рамках курса требует от студента знание элементов высшей математики и умение работать в системах автоматизированного проектирования типа Компас-3D, проводить автоматизированные расчеты в программных средах, например «MathCAD».

Навыки и умения, приобретаемые студентами в ходе решения практических задач проектирования средств поражения, будут полезными в дальнейшей опытно-конструкторской деятельности при проектировании новых боеприпасов и средств поражения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Дисциплина «Основы проектирования средств поражения» входит в число дисциплин базовой части учебного плана специальности 17.05.01 «Боеприпасы и взрыватели» специализации «Патроны и гильзы».

Учебным планом по дисциплине предусмотрено проведение лекционных (68 часов), практических (34 часа) и лабораторных (17 часов) занятий. Контроль самостоятельной работы, на которую отводится 169 часов, осуществляется в ходе практических занятий с использованием методов устного и письменного опроса. Два раза в семестр предусматривается проведение внутрисеместровой аттестации, студенты участвуют в коллоквиумах. Промежуточная аттестация осуществляется в форме экзамена.

Изучение предмета предусматривает формирование у студентов ряда компетенций, согласно которым он должен:

1) знать:

- физико-математический аппарат для решения задач проектирования средств поражения;
- характеристики комплекса тактико-технических требований, предъявляемых к образцам боеприпасов, взрывателей и системам управления действием средств поражения;
- методы проведения технических расчетов в области проектирования средств поражения;

2) уметь:

- применять физико-математический аппарат для решения задач проектирования средств поражения;
- разрабатывать комплекс тактико-технических требований, предъявляемых к образцам боеприпасов, взрывателей и системам управления действием средств поражения;
- проводить технические расчеты и оптимизацию проектных параметров при проектировании средств поражения;

3) владеть навыками:

- использования физико-математического аппарата для решения задач проектирования средств поражения;
- разработки и составления комплекса тактико-технических требований, предъявляемых к образцам боеприпасов, взрывателей и системам управления действием средств поражения;
- проведения технических расчетов в области проектирования средств поражения.

Важной составной частью освоения учебного материала по дисциплине является подготовка студентов к практическим занятиям.

На практических занятиях подробно анализируются особенности функционирования средств поражения и боеприпасов, дается физико-математический аппарат для проведения технических расчетов характеристик средств поражения и боеприпасов с учетом предъявляемых к ним тактико-технических требований.

Решение практических задач даёт возможность глубже понять теоретический материал и научиться применять его на практике. Непременным условием подготовки к практическим занятиям и зачету является изучение соответствующего материала по учебникам и конспекту лекций.

Важным компонентом подготовки квалифицированных инженеров играет самостоятельная работа студентов (СРС). Самостоятельная работа может выполняться студентами во внеаудиторное время. Основная цель СРС состоит в проверке и оценке достигнутого обучающимся уровня знаний и умений теоретического и практического характера. Получить разъяснение по отдельным видам работ можно как при личной встрече с преподавателем на консультациях, так и при помощи личных кабинетов студента и преподавателя, или электронной почты.

Самостоятельная работа студентов включает изучение программного материала по учебным и методическим пособиям, выполнение самостоятельных заданий и др.

Для успешного освоения программы курса необходимо:

- регулярно посещать лекции, практические занятия;
- выполнять задания для самостоятельной работы;
- перед занятиями изучать основные термины и определения;
- своевременно выполнять практические задания;
- готовиться к текущей аттестации.

При подготовке к промежуточному контролю желательно повторить весь пройденный мате-

риал на лекциях, практических занятиях, просмотреть литературу по данной теме, ответить на вопросы для самоконтроля.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСКОЛКОВ ОСКОЛОЧНЫХ БОЕПРИПАСОВ

Содержание занятия

Наиболее распространенный тип осколочных боеприпасов (ОБП) – боеприпасы естественного (неконтролируемого) дробления (артиллерийские снаряды, мины, АБ и т. п.). Типовая конструкция таких БП представляет собой осесимметричный корпус, выполненный из мало- или среднеуглеродистой стали и заполненный зарядом взрывчатого вещества (ВВ). При воздушном подрыве ОБП естественного дробления образуется большое количество осколков массой 10^{-6} и более граммов.

Разрушение снаряда или боевой части на осколки представляет собой сложный быстропротекающий процесс превращения энергии продуктов взрыва в энергию деформации, разрушения оболочки и метания осколков. Этот процесс условно можно разделить на следующие стадии: иницирование заряда ВВ; детонация и образование продуктов взрыва; нагружение и метание оболочки продуктами взрыва с одновременным началом пластического деформирования металла; движение расширяющейся оболочки с одновременным зарождением и ростом микротрещин и микроповреждений, образование магистральных макротрещин с последующим их выходом на внешнюю поверхность оболочки; полное прораствание трещин на всю толщину оболочки с образованием осколков и истечением продуктов взрыва в сквозные трещины; движение осколков в воздухе; взаимодействие их с целью.

Процесс взрывного расширения цилиндрической осколочной оболочки естественного дробления можно видеть на рисунке 1, где приняты следующие обозначения: b_0 – начальный внешний радиус оболочки; b_c – радиус трещинообразования (появления трещин); b_f – радиус разрушения (появления сквозных трещин, фиксируемых по прорыву продуктов детонации на внешнюю поверхность); D – скорость детонации заряда ВВ, зависящая от его плотности ρ ; v_0 – начальная скорость разлета оболочки; φ – угол между направлением вектора скорости v_0 и плоскостью, перпендикулярной к оси заряда; θ – угол поворота оболочки $\theta = 2\varphi$.

Максимальная скорость v_0 , получаемая осколками, для случаев осевой и сферической симметрии может быть рассчитана по формуле Покровского-Гарни:

– для осевой симметрии

$$v_0 = \frac{1}{2} \varphi_0 D \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}; \quad (1.1)$$

– для сферической симметрии

$$v_0 = \frac{1}{2} \varphi_0 D \sqrt{\frac{5\lambda}{10 - 4\lambda}}, \quad (1.2)$$

$$\text{где } \lambda = m_{\text{ВВ}} / M. \quad (1.3)$$

Здесь $m_{\text{ВВ}}$ – масса ВВ, г; M – масса оболочки (корпуса) снаряда.

Для оболочки естественного дробления $\varphi_0 \approx 0,98$, для оболочки заданного дробления $\varphi_0 \approx 0,90 \dots 0,95$, для оболочки с готовыми поражающими элементами $\varphi_0 \approx 0,80 \dots 0,85$.

Приближенное значение угла склонения осколочного поля φ принимается равным

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{v_0}{2D}\right). \quad (1.4)$$

Боевая эффективность ОБП естественного дробления во многом зависит от качества дробления корпуса, которое определяется рядом различных факторов: физико-механическими свойствами материала корпуса, детонационными характеристиками заряда ВВ, конструктивными особенностями БП, условиями подрыва и др.

Одним из показателей качества дробления

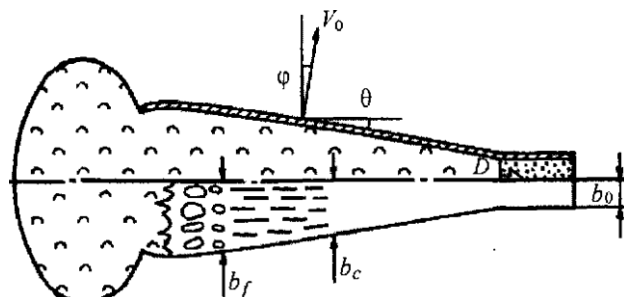


Рисунок 1 – Схема метания осколочной оболочки продуктами детонации заряда ВВ

корпусов ОБП является общее количество осколков массой, превышающей некоторый заданный уровень. Известна эмпирическая формула Юстрова для нахождения общего количества осколков N массой более 1 г:

$$N = \beta_0 \frac{m_{\text{ВВ}}}{d} \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{в}} \delta} \frac{\chi^2 + 0,5}{\chi^2 - 1}, \quad (1.5)$$

где β_0 – коэффициент, зависящий от свойств ВВ (для тротила $\beta_0 = 46$, для амматолы $\beta_0 = 30$); $m_{\text{ВВ}}$ – масса ВВ, г; d – калибр снаряда, см; $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{в}}$ – пределы текучести и прочности материала корпуса соответственно, МПа; δ – относительное удлинение материала корпуса, %; χ – коэффициент, зависящий от конструкции оболочки (для оболочек с коэффициентом наполнения $\alpha = 0,07$; 0,1 и 0,15 коэффициент $\chi = 1,8$; 1,5 и 1,4 соответственно):

$$\alpha = \frac{m_{\text{ВВ}}}{(m_{\text{ВВ}} + M)}, \quad (1.6)$$

Современные стандарты предусматривают учет осколков массой более 0,5 г.

Для подсчета общего количества осколков со стандартным нижним пределом 0,5 г Одиночным предложена эмпирическая формула

$$N_{0,5} = K \frac{\alpha}{\psi} d^2 D^2, \quad (1.7)$$

где K – коэффициент, зависящий от геометрических особенностей корпуса (для ОФ гранат $K = 70 \dots 100$); ψ – относительное сужение материала корпуса, %; D – скорость детонации заряда ВВ, км/с; α в % и d в дм.

Похожие результаты оценки величины $N_{0,5}$ дает эмпирическая формула Долинина для определения общего количества осколков осколочно-фугасных (ОФ) гранат калибра 76...152 мм с тротиловым снаряжением:

$$N_{0,5} = d^{1,619 + \frac{d-76}{1000}}, \quad \text{где } d \text{ в мм.} \quad (1.8)$$

Используя рассчитанные по формулам (1.1) – (1.4) значения общего количества осколков, можно оценить среднюю (характеристическую) массу осколка

$$m_{\text{ср}} = \frac{M}{N_{>m_s}}, \quad (1.9)$$

где $N_{>m_s}$ – общее число осколков с массой, большей нижней границы спектра m_s (обычно принимают $m_s = 1,0$ или 0,5 г).

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 1.1.

2. Используя исходные данные (таблица 1.1) и формулы (1.2)...(1.9), определить характеристики осколков боеприпаса.

Таблица 1.1 – Характеристики осколочных боеприпасов

Вариант	снаряд			разрывной заряд		
	d , мм	q , кг	материал оболочки	тип	ρ , г/см ³	$m_{\text{ВВ}}$, кг
1	76	6,20	сталь 35	тротил	1,29	0,62
2	76	6,21	сталь 20	тетрил	1,45	0,62
3	76	6,20	сталь 45	ТЭН	1,00	0,49
4	76	6,30	сталь С-60	тротил	1,46	0,62
5	100	13,41	сталь С-60	ТЭН	1,40	2,30
6	100	15,60	сталь 35	Гексоген	1,60	1,70
7	115	18,00	сталь 45	тротил	1,59	3,20
8	122	21,80	сталь С-60	тетрил	1,61	4,00
9	130	33,40	сталь 20	ТЭН	1,60	4,20

10	152	43,56	сталь 45	Гексоген	1,55	7,80
11	85	9,54	сталь 20	тетрил	1,54	1,02
12	85	9,20	сталь 20	ТЭН	1,40	0,98

Таблица 1.2 – Механические свойства углеродистых снарядных сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	a_K , кДж/м ²	HB
10	390	510	33	62	1300	174
20	500	630	19	52	1270	178
35	520	550	4	27	420	254
45	560	680	22	47	670	187
С-60 иорм.	670	790	23	39	400	217
С-60 улучш.	920	1020	18	47	400	285

Таблица 1.3 – Плотность и скорость детонации различных ВВ

Тротил		Тетрил		ТЭН		Гексоген флегматизированный	
плотность, г/см ³	скорость детонации, м/с	плотность, г/см ³	скорость детонации, м/с	плотность, г/см ³	скорость детонации, м/с	плотность, г/см ³	скорость детонации, м/с
1,0	4700	1,0	5480	0,65	4400	1,25	6660
1,29	5900	1,29	6510	0,80	4900	1,30	6875
1,46	6500	1,45	7220	1,0	5500	1,35	7125
1,59	6900	1,54	7350	1,20	6300	1,40	7315
		1,61	7470	1,40	7100	1,50	7690
				1,60	7900	1,55	7820
						1,60	7995

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРА ОСКОЛКОВ

Содержание занятия

Характеристики общего количества осколков для оболочек естественного дробления с минимальной границей массы ($N_{>m_s}$ и m_s) долгое время использовались в качестве критериев качества дробления ОБП. Так, экспериментальные исследования осколочности, проведенные в годы Великой Отечественной войны, позволили выработать следующий критерий качества фрагментации: если при подрыве ОФ снаряда в его спектре содержалось 50...55 осколков с массой более 4 г, то такое дробление считалось близким к оптимальному. Поздние исследования процессов дробления и развитие методов оценки боевой эффективности ОБП привели к необходимости разработки более детальных показателей качества дробления. В настоящее время для этого применяются дифференциальные характеристики осколочных спектров: числовое $f(m)$ и массовое $\varphi(m)$ распределения осколков по массовым группам – фракциям $N_i(m)$ и $M_i(m)$, которые определяют в результате обработки осколочных масс (спектров).

Осколочные спектры получают при проведении стандартных осколочных испытаний в бронее (рисунок 2), где осуществляется мягкое торможение осколков в специальной улавливающей среде (древесных опилках, песке и т. п.). Собранные после подрыва осколки взвешивают и сортируют по массе в определенных интервалах по всей непрерывной шкале от минимального m_s до максимального m_{\max} значений.

Следует отметить, что в соответствии с требованиями стандарта на осколочные испытания общая масса собранных осколков должна составлять не менее 95 % массы испытанного корпуса. После обработки осколочной массы заполняется таблица исходных данных по числам $N_i(m)$ и суммарным массам $M_i(m)$ осколков в массовых группах.

В качестве примера рассмотрим спектр осколков, полученных при подрыве стального цилиндрического макета с открытыми торцами, выполненного из стали 20 и снаряженного ТНТ (цилиндр имел внутренний диаметр 25 мм, внешний диаметр 37,5 мм, длину 100 мм и массу 485 г). Фракционный состав осколочных масс по результатам обработки данного спектра приведен ниже (суммарная масса осколков с массой более 0,5 г равна $M_s = 419,9$ г, а их полное число $N_s = 189$):

$m, \text{ г}$	< 0,5	0,5–1,0	1–2	2–3	3–4	4–6	6–8	8–10
$N_i(m)$	–	81	38	17	16	26	8	3
$M_i(m), \text{ г}$	64,1	56,6	57,6	42,5	55,1	124,7	56,9	26,5

Числовые и массовые распределения осколков строятся в виде ненормированных или нормированных гистограмм распределения. В первом случае по осям ординат откладываются относительные числа N_i/N_s или M_i/M_s , а во втором – значения величин

$$f(m) = \frac{N_i}{N_s} \frac{1}{\Delta m_i}; \quad \varphi(m) = \frac{M_i}{M_s} \frac{1}{\Delta m_i}, \quad (2.1)$$

где Δm_i – ширина i -го интервала масс.

Ненормированные гистограммы более просты и наиболее часто применяются на практике. Их недостаток – искажение вида распределения в группах с большими интервалами масс Δm_i . При аппроксимации спектров аналитическими выражениями необходимо пользоваться только нормированными гистограммами.

Результаты обработки данных фракционного состава для построения гистограмм ненормированного распределения приведены ниже (рисунок 3):

$m, \text{ г}$	< 0,5	0,5–1,0	1–2	2–3	3–4	4–6	6–8	8–10
N_i/N_s	–	0,429	0,201	0,090	0,085	0,137	0,042	0,016
M_i/M_s	0,132	0,117	0,119	0,088	0,114	0,258	0,118	0,054

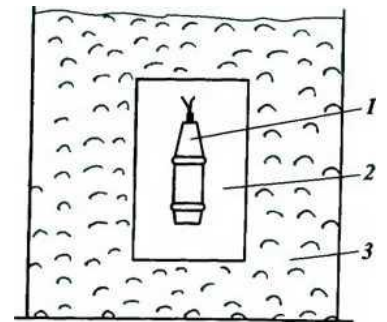


Рисунок 2 – Броняма для мягкого улавливания осколков: 1 – осколочная оболочка; 2 – воздушная полость; 3 – мягкая улавливающая среда

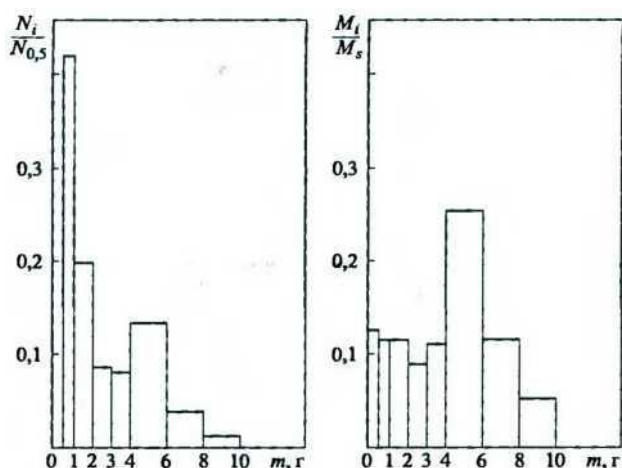


Рисунок 3 – Ненормированная гистограмма осколочного спектра стального цилиндрического макета

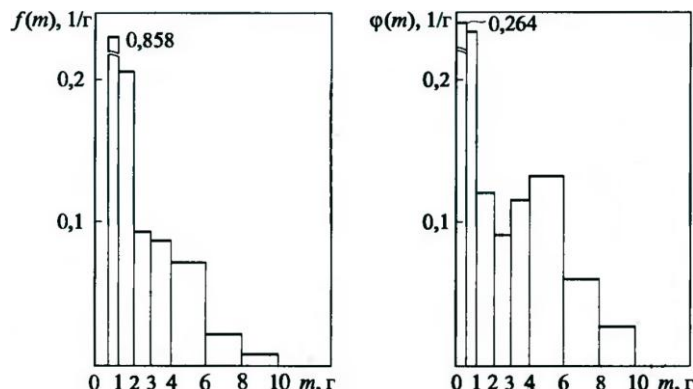


Рисунок 4 – Нормированная гистограмма осколочного спектра стального цилиндрического макета

представлено ниже (рисунок 4):

$m, \text{г} \dots\dots$	$<0,5$	$0,5-1,0$	$1-2$	$2-3$	$3-4$	$4-6$	$6-8$	$8-10$
$f(m), 1/\text{г} \dots$	–	0,858	0,201	0,090	0,085	0,069	0,021	0,008
$\varphi(m), 1/\text{г} \dots$	0,264	0,234	0,119	0,088	0,114	0,129	0,059	0,027

В настоящее время в качестве показателей дробления используются различные характеристики распределений осколочных масс.

Достаточно большое распространение получили различные аналитические формы представления осколочных спектров. Законы распределения осколков по массе применяются как в числовой $F(m)$, так и в массовой $\Phi(m)$ формах. При этом числовая форма ориентирована на оценку эффективности действия, а массовая – более выпукло выявляет ресурсы осколочной массы.

В числовой форме функция распределения случайной величины (интегрального закона распределения) вводится в виде

$$F(m) = \frac{N(<m)}{N_0}; \quad (2.2)$$

где $N(<m)$ – число осколков массой менее m ;

N_0 – полное число осколков.

Функция распределения (2.2) имеет следующие общие свойства:

- 1) функция является неубывающей, т. е. при $m_2 > m_1$ выполняется условие $F(m_2) \geq F(m_1)$;
- 2) на левой границе области определения $F(m) = 0$, а на правой границе области определения $F(m) = 1$.

Число осколков с массами в интервале (m_1, m_2) (рисунок 5) определяется соотношением

$$N_{m_1-m_2} = N_0[F(m_2) - F(m_1)].$$

Медианой массы m называют ее значение M_e , при котором $F(M_e) = 0,5$.

В массовой форме функция распределения $\Phi(m)$ определяется соотношением

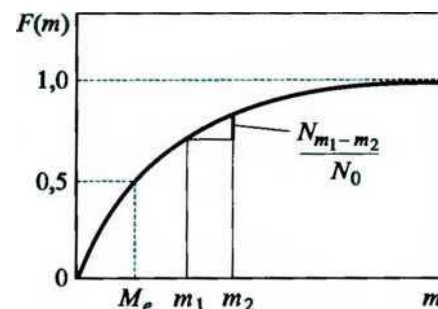


Рисунок 5 – Интегральный закон распределения числа осколков по массовым группам

$$\Phi(m) = \frac{M(< m)}{M}; \quad (2.3)$$

где $M(< m)$ – суммарная масса осколков, масса каждого из которых менее m ;

M – суммарная масса всех осколков

Массовая функция распределения (2.3) имеет свойства, аналогичные числовой функции (2.2).

При анализе баланса массы осколков массовое распределение является более информативным по сравнению с числовым, так как дает возможность выявлять потери материала осколочной оболочки на образование малоэффективных осколков мелких и крупных фракций.

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 2.1.

2. Используя исходные данные (таблица Б.1) и формулы (2.1)...(2.3), определить числовые и массовые функции распределения осколков. Для функций $f(m)$ и $\phi(m)$ построить ненормированные и нормированные гистограммы распределения, а для функций $F(m)$ и $\Phi(m)$ – графики распределения.

3. По графику распределения $F(m)$ определить медиану массы осколка M_e .

Таблица 2.1 – Распределение осколков оболочки естественного дробления по массовым группам

Вариант	Число $N_i(m)$ / масса $M_i(m)$, г осколков в массовых группах m , г							
	менее 0,5	0,5–1,0	1–2	2–3	3–4	4–6	6–8	8–10
1	– / 60,2	80 / 58,6	42 / 63,6	20 / 43,6	15 / 58,9	25 / 118,6	9 / 59,5	3 / 26,3
2	– / 66,3	75 / 61,2	46 / 62,3	28 / 70,5	19 / 65,6	24 / 100,7	8 / 52,9	2 / 18,7
3	– / 58,3	85 / 53,4	48 / 59,8	19 / 52,6	16 / 56,2	20 / 90,4	6 / 41,2	3 / 26,5
4	– / 55,6	68 / 50,2	38 / 52,6	25 / 66,5	24 / 39,5	28 / 128,5	7 / 48,1	2 / 18,6
5	– / 62,5	72 / 56,3	39 / 54,9	26 / 66,8	16 / 58,2	24 / 106,4	10 / 73,6	3 / 26,6
6	– / 59,5	59 / 54,9	42 / 55,4	24 / 65,2	25 / 89,7	22 / 97,5	11 / 69,5	4 / 36,5
7	– / 60,7	82 / 55,7	43 / 59,6	23 / 52,9	14 / 66,2	21 / 92,8	9 / 67,5	3 / 28,4
8	– / 57,6	76 / 52,6	47 / 68,3	20 / 54,7	16 / 58,7	23 / 112,8	8 / 61,3	3 / 25,9
9	– / 62,8	65 / 55,6	40 / 62,3	27 / 66,8	19 / 70,1	22 / 118,1	8 / 62,5	3 / 27,6
10	– / 64,3	77 / 59,6	44 / 64,7	22 / 48,5	18 / 62,4	26 / 126,7	7 / 52,2	2 / 18,5
11	– / 60,7	59 / 54,9	38 / 52,6	24 / 55,2	16 / 58,7	22 / 118,1	10 / 73,6	4 / 35,5
12	– / 64,3	68 / 50,2	48 / 59,8	28 / 66,5	19 / 65,6	24 / 106,4	11 / 79,5	3 / 27,6

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН ФУГАСНЫХ БОЕПРИПАСОВ

Содержание занятия

Под фугасным действием взрыва понимается разрушающее воздействие на окружающую среду и объекты (цели) разлетающихся продуктов взрыва (ПВ) и формирующейся при этом ударной волны (УВ). Фугасное действие можно разделить на контактное действие взрыва (заряд ВВ находится в непосредственном контакте с разрушаемым объектом), на близкое неконтактное действие (нагрузки на объектах связаны с торможением разлетающихся ПВ) и на действие УВ. Иногда первые два вида действия называют местным действием взрыва, а действие УВ – общим фугасным действием. Все БП, снаряженные ВВ, в той или иной мере обладают фугасным действием. Поэтому обычно под фугасными боеприпасами понимают БП крупного калибра, содержащие значительное количество ВВ, либо устройства с тонкостенными или неметаллическими корпусами, для которых фугасное действие является основным.

Если на некотором расстоянии от заряда установить датчик, регистрирующий давление в среде, то в процессе прохождения УВ он запишет эпюру давления (рисунок 6).

В момент прихода фронта волны ($t = 0$) давление от начального значения p_0 скачком изменяется до максимального p_m . За фронтом, по мере распространения волны, давление уменьшается и в некоторый момент времени τ_+ становится равным атмосферному. В дальнейшем его уровень становится ниже атмосферного, достигая минимума, а затем постепенно возрастает до значения p_0 .

Основные параметры взрывных волн, определяющие их разрушительное действие, следующие:

- максимальное избыточное давление на фронте $\Delta p_m = p_m - p_0$;
- удельный импульс положительной фазы избыточного давления $i_+ = \int_0^{\tau_+} (p - p_0) dt$;
- длительность фазы сжатия τ_+ .

Для сферического заряда ТНТ массой $m_{ВВ}$ (кг) основные параметры УВ на расстоянии r (м) рассчитывают по эмпирическим формулам, приведенным ниже.

1. При взрыве в воздухе:

$$\Delta p_m = \left[0,84 \frac{\sqrt[3]{m_{ВВ}}}{r} + 2,7 \left(\frac{\sqrt[3]{m_{ВВ}}}{r} \right)^2 + 7 \left(\frac{\sqrt[3]{m_{ВВ}}}{r} \right)^3 \right] \cdot 10^5, \text{ Па}; \quad (3.1)$$

$$i_+ = 210 \sqrt[3]{m_{ВВ}} \left(\frac{\sqrt[3]{m_{ВВ}}}{r} \right), \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \tau_+ = 1,5 \sqrt[3]{m_{ВВ}} \left(\frac{r}{\sqrt[3]{m_{ВВ}}} \right)^{1/2} \cdot 10^{-3}, \text{ с}.$$

Положительная фаза эпюры избыточного давления воздушной УВ (ВУВ) хорошо описывается зависимостью

$$\Delta p = \Delta p_m (1 - t / \tau_+) \exp(-\alpha t / \tau_+), \quad (3.2)$$

где α – коэффициент, определяемый по известному импульсу избыточного давления

$$i_+ = \frac{\Delta p_m \tau_+}{\alpha} \left(1 - \frac{e^{-\alpha}}{\alpha} \right). \quad (3.3)$$

Зависимости (3.1) справедливы в диапазоне значений расстояний $\sqrt[3]{m_{ВВ}} \leq r \leq 10 \sqrt[3]{m_{ВВ}}$.

Зависимости (3.1) рекомендованы для зарядов массой более 100 кг, так как при меньшей массе заряда заметное влияние оказывают потери энергии в результате разбрасывания поверхностного

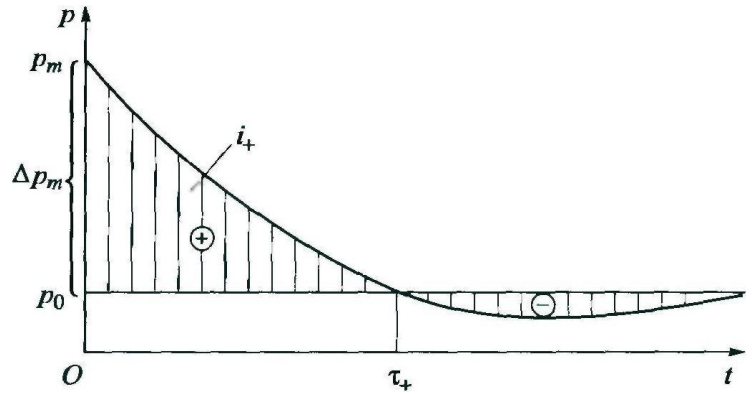


Рисунок 6 – Эпюра давления взрывной волны

слоя не прореагировавшего ВВ. Эти химические потери учитывают подстановкой в выражение (3.1) значения массы прореагировавшего ВВ (активной массы), определяемой соотношением

$$m_a = m_{\text{ВВ}} \left(1 - \frac{d_{\text{кр}}}{2r_0} \right)^3, \quad (3.4)$$

где $d_{\text{кр}}$ – критический диаметр детонации ВВ.

При взрыве в конденсированных средах типа воды и грунта химическими потерями для зарядов любой массы можно пренебречь.

2. При взрыве в воде:

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= 533 \left(\frac{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}}{r} \right)^{1,13} \cdot 10^5, \text{ Па}; \quad i_+ = 5880 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} \left(\frac{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}}{r} \right)^{0,89}, \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \theta &= 0,1 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} \left(\frac{r}{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}} \right)^{0,24} \cdot 10^{-3}, \text{ с}; \end{aligned} \quad (3.5)$$

где θ – постоянная спада давления за фронтом УВ.

При взрыве в воде протяженность фазы сжатия УВ достигает большой величины, поэтому длительность ее не является показательной характеристикой эпюры давления, которая на начальном участке хорошо описывается экспоненциальной зависимостью

$$\Delta p = \Delta p_m \exp(-t/\theta). \quad (3.6)$$

Константа θ характеризует изменение избыточного давления в окрестности фронта волны. Соотношения (3.5) справедливы в диапазоне значений $1,05 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} \leq r \leq 12,8 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}$, а первое из них для определения Δp_m можно использовать, начиная со значения $r = 0,635 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}$, что соответствует примерно 12 радиусам заряда.

3. При взрыве в грунте:

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}}{r} \right)^{\mu_1} \cdot 10^5, \text{ Па}; \quad i_+ = K_2 \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} \left(\frac{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}}{r} \right)^{\mu_2}, \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \tau_+ &= \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} \left(K_3 + K_4 \frac{r}{\sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}}} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ с}; \end{aligned} \quad (3.7)$$

где K_i , μ_i – константы для некоторых типов неводонасыщенных грунтов естественного сложения (таблица В.2).

В грунтах вблизи места взрыва волны являются ударными, но по мере удаления от центра взрыва УВ преобразуются в волны сжатия с постепенным подъемом давления за фронтом волны до максимального значения и последующим его спадом. Диапазон использования формул (3.7) ограничен величиной $\Delta p_m \geq 10^5$ Па, откуда можно определить соответствующий радиус $0 \leq r \leq \sqrt[3]{m_{\text{ВВ}}} K_1^{1/\mu_1}$. Избыточное давление по аналогии с (3.5) Δp описывается зависимостью:

$$\Delta p = \Delta p_m \exp(-t/\tau_+). \quad (3.8)$$

Сравнивая выражения (3.1)–(3.6), можно сделать следующий вывод: если в воздухе давление Δp_m плавно изменяется от стадии сильного взрыва к акустической, то УВ в воде быстро переходит в акустическую ($\Delta p_m \sim 1/r$), а в неводонасыщенных грунтах (вплоть до достаточно низких давлений) затухает подобно сильной УВ ($\Delta p_m \sim 1/r^3$). Последнее обстоятельство связано с пористой структурой грунта и наличием заземленного в грунте воздуха.

При определении параметров взрыва зарядов других ВВ пользуются принципом энергетического подобия, из которого следует, что параметры УВ не изменяются, если остается постоянной выделяющаяся энергия. Таким образом, в формулы (3.1), (3.5) и (3.7) следует подставлять массу тротилового эквивалентного заряда ВВ, которую находят из условия $m_{\text{Э}} Q_{\text{ТНТ}} = m_{\text{ВВ}} Q$, откуда

$$m_{\text{Э}} = m_{\text{ВВ}} \frac{Q}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (3.9)$$

где Q и $Q_{\text{ТНТ}}$ – удельные теплоты взрыва используемого ВВ и тротила ($Q_{\text{ТНТ}} = 4228$ кДж/кг).

Оболочка заряда неоднозначно влияет на параметры взрыва. С одной стороны, она заметно снижает начальные параметры УВ и отбирает энергию на деформацию, разрушение корпуса и разгон осколков, с другой – уменьшает химические и энтропийные потери при взрыве и возвращает часть энергии в УВ при торможении осколков в окружающей среде. Эксперименты показывают, что при значении коэффициента наполнения, большем 0,4; влиянием оболочки на параметры воздушных взрывных волн можно пренебречь. При взрыве в плотных средах, где осколки практически сразу тормозятся, влияние оболочки еще менее заметно.

Формулы (3.1)–(3.7) справедливы для сферических зарядов при центральном инициировании, однако в указанных диапазонах ими можно пользоваться также и для оценки параметров взрыва компактных зарядов любой формы (с отношением характерных размеров порядка единицы) и при произвольной точке инициирования, так как уже на расстояниях порядка нескольких длин заряда в конденсированных средах и 10–15 длин заряда в воздухе указанные факторы практически перестают влиять на параметры УВ.

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 3.1.

2. Используя исходные данные (таблица 3.1) и формулы (3.1)–(3.8), определить параметры УВ Δp_m , i_+ , τ_+ (для воды – θ) в различных средах: воздухе, воде, грунте на нескольких расстояниях r (4 значения) от заряда в пределах действия формул. Для одного из расстояний r оценить изменение давления УВ Δp по времени t (4 значения) для этих же сред. Результаты расчетов представить в виде графиков. При расчете указанных параметров для ВВ, отличного от тротила (ТНТ) использовать вместо массы $m_{\text{ВВ}}$ массу тротилового эквивалента $m_{\text{Э}}$ (3.9). В воздушной среде учесть химические потери путем определения активной массы m_a (3.4), где радиус сферического заряда r_0 определяется из формулы объема шара с учетом плотности ВВ $\rho_{\text{ВВ}}$: $\frac{m_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{ВВ}}} = \frac{4}{3} \pi r_0^3$.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета параметров ударных волн в различных средах

Вариант	Грунт	Характеристики заряда				
		$m_{\text{ВВ}}$, кг	ВВ	Q , кДж/кг	$d_{\text{кр}}$, мм	$\rho_{\text{ВВ}}$, г/см ³
1	песчаный	85	Гексоген	5000	2,5	1,00
2	суглинистый	56	Октоген	5460	4,5	1,90
3	лёссовидный	62	ТЭН	5440	2,0	1,00
4	песчаный	75	Гексоген	5530	4,4	1,80
5	суглинистый	95	Октоген	5460	4,5	1,90
6	лёссовидный	71	ТЭН	5870	3,2	1,77
7	песчаный	58	Гексоген	5000	2,5	1,00
8	суглинистый	67	Октоген	5460	4,5	1,90
9	лёссовидный	84	ТЭН	5440	2,0	1,00
10	песчаный	69	Гексоген	5530	4,4	1,80
11	суглинистый	72	Октоген	5460	4,5	1,90
12	лёссовидный	65	ТЭН	5870	2,0	1,77

Таблица 3.2 – Значения констант для определения параметров взрывных волн в грунте

Грунт	K_1	μ_1	K_2	μ_2	K_3	K_4
Песчаный	7,5	3	4000	1,5	4	16
Суглинистый	8	3	4000	1,5	10	10
Лёссовидный	4,5	2,8	5000	1,65	14	14

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4. ОЦЕНКА МОГУЩЕСТВА ФУГАСНЫХ СНАРЯДОВ И МИН

Содержание занятия

Основное отличие фугасных снарядов и мин от осколочных заключается в наличии у них значительно большего количества ВВ, что позволяет применять их для разрушения прочных огневых сооружений, командных пунктов, узлов связи, имеющих деревоземляные, деревокаменно-земляные и легкие железобетонные защитные покрытия.

Фугасные снаряды в сравнении с осколочными и осколочно-фугасными снарядами имеют значительно больший коэффициент наполнения. Для снарядов к гаубицам и мортирам он может составлять более 20 %, для снарядов к пушкам – около 15 %. Фугасные снаряды к гаубицам и особенно к мортирам обладают высоким могуществом действия, в том числе и осколочным. Последнее обеспечивается за счет высокого коэффициента наполнения ВВ. Корпус при разрыве дробится на большое количество осколков, которым сообщается большая скорость, чем у осколочных и осколочно-фугасных снарядов, что позволяет им сохранять свои убойные свойства на значительном расстоянии от места взрыва.

Воронки, образуемые при взрыве снарядов в грунте, позволяют оценивать их могущество независимо от характера и прочности цели. Фугасное действие снарядов и мин измеряется абсолютным или отнесенным к массе разрывного заряда объемом воронки.

Вследствие неоднородности грунта и несимметричности размещения снаряда относительно свободной поверхности воронки обычно имеют довольно неправильную форму. В полигонной практике форму воронки принимают в виде простого усеченного конуса с большим основанием, лежащим на поверхности грунта, и малым основанием радиусом, равным половине радиуса воронки. При этом глубина воронки оказывается равной глубине взрыва заряда h (Рисунок 7з). Очевидно, что объем воронки V может быть выражен через глубину h и показатель действия взрыва (показатель выброса) n :

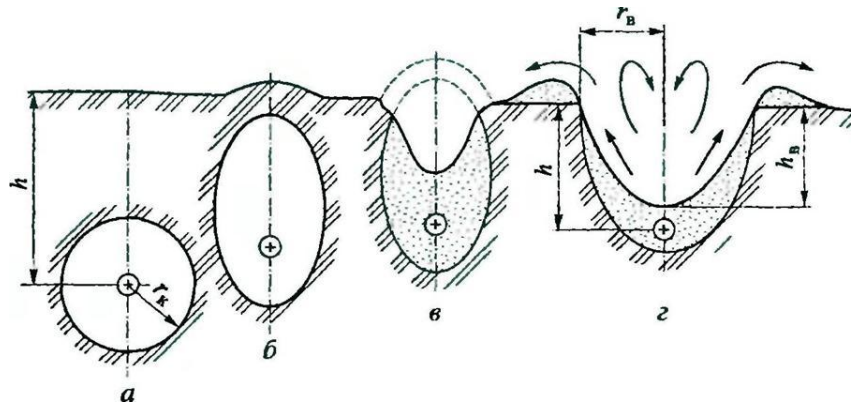


Рисунок 7 – Образование воронки при взрыве в грунте: а) – камуфлетная полость; б) – полость, образующаяся в результате влияния свободной поверхности; в) – провальная воронка; з) – воронка выброса

$$V = \frac{7}{12} \pi h r_b^2 \approx 1,83 n^2 h^3, \quad \text{где } n = r_b/h. \quad (4.1)$$

Наиболее характерны для фугасного действия артиллерийских снарядов и мин воронки нормального ($n = 1$) и усиленного ($n > 1$) выброса. Наивыгоднейшее фугасное действие соответствует такому заглублению снаряда в преграду, когда один килограмм ВВ выбрасывает наибольшее количество грунта, достигающее 2,2...2,5 м³.

Глубина воронки h_b в связанных грунтах может быть определена по соотношению

$$h_b = k_b r_b, \quad (4.2)$$

где k_b – коэффициент, зависящий от свойств грунта ($k_b = 0,4...0,5$ для сухого песка, $k_b = 0,45...0,55$ для влажного песка и суглинка, $k_b = 0,5...0,7$ для глины).

Оценить радиус воронки r_b можно из выражения для массы эквивалентного тротилового заряда m_3 с размерами воронки при не очень большой глубине заложения заряда ($h < 25$ м):

$$m_3 = 3,36 \frac{(3n^2 + 4)^2}{n^3(n + 97)K_p^3} r_b^3, \quad (4.3)$$

где K_p – коэффициент, зависящий от свойств твердой среды, м/кг^{1/3}:

Грунт обыкновенный.....	1,15–1,25
Глина средней плотности.....	1,10–1,18
Песок.....	1,00–1,08
Бетон.....	0,82–0,90
Железобетон.....	0,50–0,60

Влияние разнообразных, трудно поддающихся точному учету факторов на величину фугасного действия чрезвычайно затрудняет подбор оптимального замедления срабатывания взрывателей и вынуждает останавливаться на некоторых средних значениях. При слишком большом замедлении взрывателя происходит подземный взрыв снаряда (Рисунок 7а). Под действием высокого давления ПД слои породы, непосредственно примыкающие к заряду, раздавливаются (изменяют внутреннюю структуру), сильно сжимаются и, переходя в пластическое состояние, перемещаются в радиальном направлении. В результате чего порода полностью вытесняется продуктами взрыва, образуя полость которую называют *зоной вытеснения*, или *камуфлетной полостью*. Стрельбу на камуфлетах используют для разрушения подземных сооружений.

К зоне вытеснения примыкает зона сильно деформированной и уплотненной породы. Для нее, особенно в однородных горных породах, характерно наличие системы спиральных поверхностей скольжения, касательные к которым образуют углы около 45° к радиальным направлениям, исходящим из центра заряда.

По мере удаления от места взрыва в движение вовлекается все увеличивающаяся масса среды, вследствие чего плотность энергии, сообщенной единице объема среды, уменьшается, а напряжения сжатия убывают. На некотором расстоянии они становятся меньше предела прочности материала. Начиная с этого расстояния, структура среды остается в основном такой же, какой она была до взрыва: отсутствуют поверхности скольжения и ничтожно мало уплотнение материала. Однако в этой зоне еще значительны радиальные смещения частиц среды, вызывающие такие растягивающие напряжения, которые приводят к разрыву породы и образованию системы радиальных трещин. Зону, в которой наблюдаются радиальные трещины, называют *зоной разрыва среды*.

Зоны вытеснения, раздавливания и разрыва можно объединить в единую *зону разрушения*, так как твердая среда в этой области претерпевает разрушение в той или иной форме. За зоной разрушения породы следует зона пластических, а затем упругих деформаций, не вызывающих нарушение сплошности среды, которая называется *зоной сотрясения*. Находящиеся в этой зоне объекты подвергаются так называемому сейсмическому действию взрыва, вызванному распространением по породе волны сжатия.

При взрыве сосредоточенного заряда радиус зоны разрушения R_p (м) можно вычислить по эмпирической зависимости

$$R_p = K_p \sqrt[3]{m_{\text{Э}}} , \quad (4.4)$$

где K_p – в $\text{м/кг}^{1/3}$; $m_{\text{Э}}$ – в кг.

Радиус камуфлетной полости пропорционален радиусу зоны разрушения (4.4) и примерно равен

$$r_k \approx 0,36 R_p. \quad (4.5)$$

Разрушение подземных объектов фугасным зарядом наступает тогда, когда они оказываются в пределах радиуса зоны разрушения R_p . Для расчета поражающего действия используют метод эквивалентных слоев. Слой материала объекта разрушения толщиной s заменяют эквивалентным по сопротивляемости слоем грунта $s_{\text{Э}}$:

$$\frac{s_{\text{Э}}}{K_p} = \frac{s}{K_{p1}}, \quad (4.6)$$

где K_p и K_{p1} – коэффициенты, определяющие размеры зон разрушения в грунте и материале объекта соответственно.

Отсюда радиус зоны разрушения может быть найден по формуле

$$R_p = K_p \sqrt[3]{m_{\text{Э}}} - s_{\text{Э}} = K_p \left(\sqrt[3]{m_{\text{Э}}} - \frac{s}{K_{p1}} \right). \quad (4.7)$$

Тогда масса эквивалентного тротилового заряда ВВ, необходимого для разрушения объекта на

расстоянии R_p , определяется из выражения (4.7) следующим образом:

$$m_{\ominus} = \left(\frac{R_p}{K_p} + \frac{s}{K_{p1}} \right)^3. \quad (4.8)$$

Из формулы (4.4) можно определить максимальную толщину стенки объекта разрушения, соответствующую подрыву заряда на поверхности объекта ($R_p = 0$):

$$s_{\max} = K_{p1} \sqrt[3]{m_{\ominus}}. \quad (4.9)$$

Путь L (м), пройденный фугасным снарядом (миной) в грунте, и время движения T (с) можно оценить по формулам:

$$L = \frac{q}{2K_2 b_1 \lambda S} \ln(1 + b_1 v_c^2); \quad (4.10)$$

$$T = \frac{2L}{v_c}, \quad (4.11)$$

где q – вес снаряда (мины), кг;

K_2, b_1 – экспериментальные коэффициенты (таблица 4.1);

λ – коэффициент, зависящий от относительной высоты головной части ударника $l_{\text{гч}}/d$, где $l_{\text{гч}}$ – длина головной части (таблица 4.2);

S – площадь поперечного сечения снаряда (мины), м^2 ; $S \approx 0,785d^2$.

Таблица 4.1 – Значения эмпирических коэффициентов K_2 и b_1

Среда	$K_2 \cdot 10^{-6}$	$b_1 \cdot 10^6$
Грунт обыкновенный	4,5	60
Глина средней плотности	10,2	35
Песок естественной влажности	4,3	20
Песок водонасыщенный	4,3	20
Дерево (хвойные породы)	11,4	10
Кирпичная кладка	31	15

Таблица 4.2 – Значения коэффициента λ

$l_{\text{гч}}/d$	λ	$l_{\text{гч}}/d$	λ
0–0,5	1,1	1,0–1,5	0,9
0,5–1,0	1,0	1,5–2,0	0,8

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 4.3.

2. Рассчитать размеры (r_b, h_b, h) и объем воронки выброса V , на основе формул (4.1)–(4.3). Массу тротилового эквивалента можно определить из равенства $m_{\ominus} Q_{\text{ТНТ}} = m_{\text{ВВ}} Q$.

3. В случае взрыва в грунте на глубине дополнительно оценить радиусы зоны разрушения R_p (4.4) и зоны вытеснения (камуфлетной полости) r_k (4.5).

4. Оценить радиус зоны разрушения R_p (4.7) при условии разрушения подземного укрепления из заданного материала с толщиной стенки s . Также установить максимально возможную пробиваемую толщину s_{\max} стенки укрепления (4.9) при условии подрыва заряда на наружной поверхности стенки.

5. Вычислить путь L , пройденный фугасным снарядом (миной) в грунте, и время движения T по формулам (4.10) и (4.11).

Таблица 4.3 – Исходные данные

Вари- ант	снаряд (мина)					разрывной заряд			среда	укрепление	
	d , мм	$l_{гч}$, мм	q , кг	v_c , м/с	n	$m_{ВВ}$, кг	ВВ	Q , кДж/кг		материал	s , м
1	76	120	6,20	400	1,05	0,62	тротил	4330	грунт	бетон	0,20
2	76	115	6,21	350	1,10	0,62	тетрил	4620	песок	бетон	0,25
3	76	100	6,20	320	1,15	0,49	ТЭН	5440	глина	бетон	0,30
4	76	90	6,30	280	0,97	0,62	тротил	4500	грунт	железобетон	0,20
5	100	95	13,41	110	1,20	2,30	ТЭН	5870	песок	бетон	0,45
6	100	90	15,60	150	1,16	1,70	гексоген	5530	глина	бетон	0,40
7	115	120	18,00	320	1,18	3,20	тротил	4420	грунт	железобетон	0,35
8	122	160	21,80	210	1,06	4,00	тетрил	4750	песок	бетон	0,57
9	130	100	33,40	120	1,12	4,20	ТЭН	5440	глина	бетон	0,62
10	152	290	43,56	550	0,95	7,80	гексоген	5000	грунт	железобетон	0,40
11	115	125	17,55	340	1,02	3,15	тротил	4430	песок	бетон	0,59
12	152	300	44,22	540	1,09	7,85	тетрил	4760	глина	бетон	0,48

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

Содержание занятия

Рассмотрим инженерный метод, разработанный Л.П. Орленко и предназначенный для оперативного расчета основных параметров кумулятивных зарядов (КЗ) с коническими облицовками высокого прогиба, обеспечивающих формирование классических кумулятивных струй (КС). Именно такие КЗ характерны для большинства из рассмотренных выше кумулятивных средств поражения (СП) и боеприпасов (БП).

Метод основан на гидродинамической теории кумуляции, а также ряде приближенных соотношений по определению активной массы заряда, скорости метания облицовки, угла схлопывания отдельных элементов облицовки и экспериментальных данных. В силу широкого использования экспериментальных данных для тарировки или определения отдельных параметров функционирования КЗ этот класс методов иногда называют расчетно-экспериментальным.

Расчетная схема функционирования КЗ показана на рисунке 8. Предполагается, что с момента подхода к вершине КО фронт детонационной волны является плоским и далее распространяется в направлении оси заряда.

Кумулятивная струя формируется последовательно, начиная с элементов, лежащих у вершины кумулятивной облицовки (КО). Процессы схлопывания облицовки и формирования КС могут быть рассчитаны приближенно, для чего вводят систему координат, исходящую из точки O , расположенной на некотором удалении от геометрической вершины КО. Далее разбиваем КО по высоте h на n в общем случае неравных сечений плоскостями, перпендикулярными оси симметрии заряда, и рассматриваем последовательность расчета произвольного i -го элемента облицовки высотой Δz_i .

Среднюю скорость схлопывания i -го элемента КО можно определить по формуле

$$v_{KOi} = 0,5\chi_i D \sqrt{\frac{\beta_i}{\beta_i + 2}}, \quad (5.1)$$

где D – скорость детонации;

$\beta_i = m_{ai}/M_{KOi}$ – коэффициент нагрузки;

m_{ai}, M_{KOi} – активная масса заряда и метаемая масса КО в i -м сечении.

Коэффициент χ_i учитывает отклонение принятой модели метания от реально происходящего процесса схлопывания. В первом приближении $\chi_i = 1$. Для показателя изоэнтропы ПД $k = 3$ и $\chi_i = 1,2$ для $k = 2,55$.

Активная масса m_{ai} вычисляется по формуле

$$m_{ai} = \frac{m_{BVi}}{2} \left(1 + \frac{M_i - M_{KOi}}{M_{KOi} + M_i + m_{BVi}} \right), \quad (5.2)$$

где m_{BVi} и M_i – массы заряда и его наружной оболочки в рассчитываемом сечении.

Скорость, масса и энергия элемента КС определяются по формулам гидродинамической теории кумуляции:

$$\begin{aligned} v_{KCi} &= v_{KOi} \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right); \\ M_{KCi} &= M_{KOi} \sin^2 \left(\frac{\alpha_i}{2} \right); \\ E_{KCi} &= \frac{M_{KCi} v_{KCi}^2}{2}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где α_i – угол схлопывания i -го элемента КО (см. треугольник ABC на рисунке 8).

К моменту начала формирования i -го элемента струи значение тангенса угла α_i составит:

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = \frac{\tilde{r}_{i+1}}{\Delta z_i} = \frac{r_{i+1} - \bar{v}_{\text{KO}i+1}(r_i / \bar{v}_{\text{KO}i} - \Delta t_i)}{\Delta z_i}, \quad (5.4)$$

где Δt_i – время прохождения детонационной волной i -го элемента КС, $\Delta t_i = z_{0i}/D$;
 $\bar{v}_{\text{KO}i} = (v_{\text{KO}i-1} + v_{\text{KO}i})/2$ определяет скорость перемещения верхней границы, а
 $\bar{v}_{\text{KO}i+1} = (v_{\text{KO}i} + v_{\text{KO}i+1})/2$ – скорость нижней границы i -го элемента.

Для расчета угла схлопывания первого и последнего элементов приближенно принимают $\bar{v}_{\text{KO}1} \approx v_{\text{KO}1}$, $\bar{v}_{\text{KO}n+1} \approx v_{\text{KO}n}$ или используют экстраполяционные зависимости вида

$$\bar{v}_{\text{KO}1} = \frac{4v_{\text{KO}1} - 3v_{\text{KO}2} + v_{\text{KO}3}}{2}; \quad \bar{v}_{\text{KO}n+1} = \frac{4v_{\text{KO}n} - 3v_{\text{KO}n-1} + v_{\text{KO}n-2}}{2}. \quad (5.5)$$

Начальная длина элемента струи l_{0i} равна длине образующей элемента КО (см. рисунок 8). За время полета элемент удлинится на Δl_i под действием сил, вызванных наличием значительных градиентов осевых составляющих скоростей, причем на расстоянии $F_i = z_i - z_{0i} - l_{0i}$ от места образования удлинение элемента КС можно определить следующей зависимостью:

$$\Delta l_i = l_{0i} \frac{F_i}{v_{\text{KC}i}} \operatorname{grad} v_{\text{KC}i} = l_{0i} (t_i - t_{0i}) \&_{z_{0i}} = 0,5(t_i - t_{0i})(v_{\text{KC}i-1} - v_{\text{KC}i+1}), \quad (5.6)$$

где $\operatorname{grad} v_{\text{KC}i} = \&_{z_{0i}} = 0,5(v_{\text{KC}i-1} - v_{\text{KC}i+1})/l_{0i}$ – начальный градиент осевой скорости; для первого и последнего элементов необходимо воспользоваться экстраполяционными зависимостями вида

$$v_{\text{KC}0} = 3v_{\text{KC}1} - 3v_{\text{KC}2} + v_{\text{KC}3}; \quad v_{\text{KC}n+1} = 3v_{\text{KC}n} - 3v_{\text{KC}n-1} + v_{\text{KC}n-2}. \quad (5.7)$$

t_i – текущее время, отсчитываемое от момента подхода фронта детонационной волны к началу выбранной системы координат (точка O на рисунке 8);

t_{0i} – момент образования i -го элемента струи:

$$t_{0i} = z_{0i}/D + r_i/\bar{v}_{\text{KO}i} + l_{0i}/v_{\text{KC}i}. \quad (5.8)$$

Тогда полная текущая длина элемента КС равна

$$l_i = l_{0i} + \Delta l_i \leq n_{bi} l_{0i}, \quad (5.9)$$

где n_b – коэффициент предельного удлинения элемента КС.

Данный параметр может быть определен на основе экспериментальных исследований по следующей зависимости:

$$n_{bi} = A + BR_{\text{KC}0i} \&_{z_{0i}}, \quad (5.10)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые экспериментально для конкретного материала облицовки (таблица 5.1);

$R_{\text{KC}0i}$ и $\&_{z_{0i}}$ – начальные значения радиуса и градиента скорости вдоль КС:

$$R_{\text{KC}0i} = \sqrt{M_{\text{KC}i}/(\pi l_{0i} \rho_{\text{KC}})}, \quad (5.11)$$

где ρ_{KC} – плотность материала кумулятивной струи.

Таблица 5.1 – Экспериментальные значения для расчета коэффициентов предельного удлинения n_b некоторых материалов

Материал	A	B , мкс/мм	Материал	A	B , мкс/мм
Алюминий	1,5	12,2	Сталь 20	1,6	8,0
Медь	1,8	15,2	Тантал	2,2	18,0
Никель	1,8	14,0	Цирконий	1,5	25,9
Ниобий	2,4	17,7			

Максимально возможная длина элемента струи l_{mi} находится по соотношению $l_{mi} = n_{bi}l_{0i}$. Это условие определяет время t_{mi} и осевую координату z_{mi} разрыва i -го элемента (отмечена крестиком на рисунке 8):

$$t_{mi} = t_{0i} + \frac{2(l_{mi} - l_{0i})}{v_{KC i-1} - v_{KC i+1}} = t_{0i} + \frac{2l_{0i}(n_{bi} - 1)}{v_{KC i-1} - v_{KC i+1}}; \quad z_{mi} = z_{0i} + (t_{mi} - t_{0i})v_{KC i}. \quad (5.12)$$

Очевидно, что если $z_{mi} - z_{0i} - l_{0i} < F_i$, то текущий элемент КС разрывается до начала момента проникания, в противном случае он внедряется в преграду в неразорванном состоянии.

Согласно гидродинамической теории кумуляции, глубина L_i и скорость проникания (пробития) $v_{при}$ i -го элемента в преграду определяются следующим образом:

$$L_i = \beta \xi_i l_i \sqrt{\frac{\rho_{КС}}{\rho_{п}}}; \quad v_{при} = v_{KC i} \frac{\sqrt{\rho_{КС}/\rho_{п}}}{\sqrt{\rho_{КС}/\rho_{п}} + 1}, \quad (5.13)$$

где $\beta = \rho_{ВВ} D^2 / (\rho_{ВВ} D^2)_0$ – коэффициент, учитывающий влияние ВВ;

$(\rho_{ВВ} D^2)_0$ – характеристика опорного состава ВВ ($\rho_{ВВ} = 1,65 \text{ г/см}^3$, $D = 8,1 \text{ км/с}$);

$\xi_i = (v_{KC i} - v_{KC}^*) / v_{KC}^*$ – экспериментальный коэффициент, учитывающий влияние скорости на глубину пробития;

v_{KC}^* – критическая скорость пробития (таблица 5.2), причем $\xi_i = 0$ при $v_{KC i} < v_{KC}^*$, а при $v_{KC i} \geq 4 \text{ км/с}$ $\xi_i = 1$;

$\rho_{п}$ – плотность материала преграды.

Таблица 5.2 – Значения критической скорости пробития КС в зависимости от материалов преграды и КО

Материал преграды	Материал КО	v_{KC}^* , м/с
Сталь:		
закаленная, 50 HRC	Сталь	2200
125 НВ	Сталь/дюралюминий	2050/3300
Дюралюминий, 115 НВ	Дюралюминий	2900
Бетон	Медь/сталь	1500/1900
Мрамор	Медь	1600
Известняк	»	1500
Песчаник	»	1300
Лед	»	1800
Грунт мерзлый	Сталь	1000

Итоговая глубина пробития КЗ гомогенной преграды на фокусном расстоянии F определяется по формуле

$$L = \sum_{i=1}^n L_i. \quad (5.14)$$

Диаметр пробоины в преграде рассчитывают по приближенной зависимости, полученной в предположении пропорциональности кинетической энергии элемента КС $E_{KC i}$ работе деформирования, необходимой для образования цилиндрической каверны диаметром $d_{отв}$ и длиной L_i :

$$d_{отв} = \sqrt{4 \frac{E_{KC i}}{A_W \pi L_i}}, \quad (5.15)$$

где A_W – удельная работа вытеснения единицы объема материала преграды, определяемая по экспериментальным данным (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Плотность преграды (мишени) и удельная работа вытеснения A_W для различных материалов

Материал мишени		Техн. чистое железо	Дюра- люми- ний	Медь	Алю- миний	Свинец
Плотность металла мишени, г/см ³		7,85	2,8	8,9	2,7	11,34
Удельная работа вытеснения объема A_W , ГПа	Расчет	2,9	2,5	1,17	0,86	~ 0,13
	Эксперимент	2,8	2,2	1,2	0,83	~ 0,1

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 5.4.

2. Разбить выбранный кумулятивный заряд по высоте от 0 до h (рисунок 9) на 8 равных поясов. Для каждого расчетного пояса определить объемные, массовые и скоростные характеристики заряда ВВ, КО и КС по формулам (5.1)–(5.12) и подобрать оптимальное фокусное расстояние. Рассчитать глубину проникания КС L , диаметр отверстия $d_{отв}$ по формулам (5.13)–(5.15).

Таблица 5.4 – Исходные данные

Ва- риант	Заряд ВВ			Кумулятивная облицовка					Оболочка		Преграда
	$\rho_{ВВ}$, г/см ³	D , км/с	H , мм	h , мм	$d_{КО}$, мм	$\delta/d_{КО}$	d_h , мм	мате- риал	$d_{об}$, мм	$\rho_{об}$, г/см ³	материал
1	1,25	6,66	130	70	61	0,03	7	сталь	74	7,80	железо
2	1,30	6,88	165	98	77	0,02	7	медь	97	7,79	дюраль
3	1,40	7,32	170	105	90	0,06	22	дюраль	112	7,82	медь
4	1,45	6,40	150	89	93	0,03	14	медь	119	7,81	алюминий
5	1,20	6,30	190	110	117	0,04	19	сталь	148	7,80	свинец
6	1,40	7,10	98	56	60	0,03	8	сталь	74	7,79	свинец
7	1,60	7,90	170	95	78	0,02	7	медь	97	7,82	медь
8	1,50	7,69	165	108	89	0,05	18	дюраль	112	7,81	железо
9	1,54	7,35	210	120	94	0,03	12	сталь	119	7,80	дюраль
10	1,59	6,90	220	128	118	0,03	17	медь	148	7,79	алюминий
11	1,40	7,10	165	98	77	0,02	7	сталь	97	7,79	железо
12	1,60	7,90	130	70	61	0,03	7	медь	74	7,80	дюраль

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6. **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ** **ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ**

Содержание занятия

Динамическая защита (ДЗ) обеспечивает защиту от ударно-проникающего действия кумулятивных боеприпасов и боеприпасов кинетического действия: бронебойных подкалиберных оперенных снарядов (БОПС) и формируемых взрывом снарядов (ударных ядер).

Принцип действия ДЗ заключается в воздействии на боковую поверхность КС или БОПС движущихся под углом к средству поражения элементов преграды, в качестве которых обычно выступают стальные пластины (рисунок 10). Это воздействие приводит к отклонению (возмущению прямолинейной формы) КС или БОПС, разрушению или срабатыванию проникающего тела, вследствие чего существенно уменьшается глубина пробития основной части преграды, расположенной за устройством ДЗ.

Увеличение эффективности ДЗ требует решения таких задач, как уменьшение длины лидера КС, увеличение степени повреждения основной части КС и недопущение прохождения через ДЗ хвостовой части КС без воздействия на нее пластин ДЗ. При решении этих задач необходимо понимание физических процессов, возникающих при проникании КС через элементы ДЗ и определяющих эффективность защищающей способности ДЗ. Эти процессы нужно рассматривать в следующей последовательности: 1) формирование отверстий в пластинах ЭДЗ при их пробитии КС; 2) инициирование детонации в заряде ВВ ЭДЗ; 3) взрывное метание пластин ограниченных поперечных размеров; 4) взаимодействие движущихся пластин с КС.

В настоящее время достигнут достаточно высокий уровень понимания этих физических процессов, что позволяет с хорошей точностью проводить расчеты основных параметров функционирования ДЗ. Расчет проводится в той же последовательности для каждого элемента КС (см. практическое занятие 5).

1. Формирование отверстий в пластинах ЭДЗ при их пробитии КС. Естественно предположить, что время формирования отверстия в лицевой пластине t_{ei} i -м элементом КС пропорционально времени ее пробития:

$$t_{ei} = \frac{4,5\delta_1}{v_{\text{пр}i} \cos \theta}, \quad (6.1)$$

где δ_1 – толщина лицевой пластины;

θ – угол между КС и нормалью к пластине (рисунок 11).

$v_{\text{пр}i}$ – скорость проникания i -го элемента КС, определяемая по формуле (5.13).

Диаметр отверстия в полубесконечной преграде из материала пластины $d_{\text{отв}i}$:

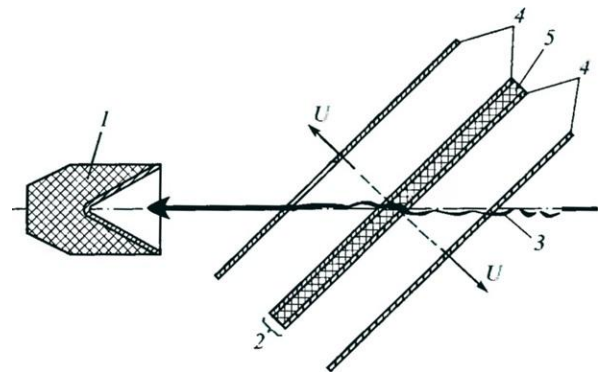


Рисунок 10 – Принцип действия взрывной ДЗ: 1 – кумулятивный заряд; 2 – элемент ДЗ; 3 – поврежденная КС; 4 – пластины; 5 – заряд ВВ; U – скорость взрывного метания пластин

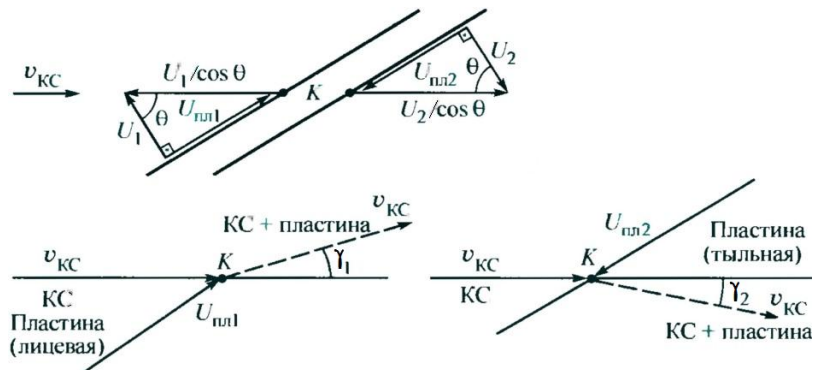


Рисунок 11 – Кинематика взаимодействия КС с пластинами ЭДЗ

$$d_{\text{отв}i} = \frac{\sqrt{\rho_{\text{пл}}\rho_{\text{КС}}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{ТД}}(\sqrt{\rho_{\text{КС}}} + \sqrt{\rho_{\text{пл}}})}} d_{\text{КС}i} v_{\text{КС}i}, \quad (6.2)$$

где $d_{\text{КС}i}$ и $v_{\text{КС}i}$ – диаметр и скорость i -го элемента КС;
 $\sigma_{\text{ТД}}$ – динамический предел текучести материала пластины;
 $\rho_{\text{пл}}$ и $\rho_{\text{КС}}$ – плотности материалов пластины и КС соответственно.
 Максимальный диаметр отверстия в пластине $d_{\text{max}i}$:

$$d_{\text{max}i} = \sqrt{d_{\text{отв}i}^2 - \left(\sqrt{d_{\text{отв}i}^2 - d_{\text{КС}i}^2} - 2t_{ei} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ТД}}}{\rho_{\text{пл}}}} \right)^2} \quad (6.3)$$

2. Иницирование детонации взрывчатого вещества элемента динамической защиты.

Характерное время задержки возникновения детонации τ_d в заряде взрывчатого вещества ЭДЗ определяется скоростью детонации D и толщиной слоя h ВВ:

$$\tau_d \approx \frac{h}{D}. \quad (6.4)$$

3. Взрывное метание пластин ограниченных поперечных размеров. Поскольку эффект ДЗ основан на взаимодействии средства поражения с движущейся пластиной, то правильное определение скорости метания пластин важно для расчета эффективности ДЗ.

Формулы для расчета скорости метания лицевой и тыльной пластин U_1 и U_2 с соответствующими толщинами δ_1 и δ_2 при линейном распределении скорости продуктов детонации имеют вид

$$U_1 = \sqrt{2Q} \sqrt{\frac{3\beta_1}{3 + \beta_1 + \frac{\beta_2}{\beta_1} \frac{\beta_1 + 2}{(\beta_2 + 2)^2} (\beta_1 + 2\beta_2 + 6)}}; \quad U_2 = U_1 \frac{\beta_2}{\beta_1} \frac{\beta_1 + 2}{\beta_2 + 2}, \quad (6.5)$$

Здесь Q – теплота взрыва, отвечающая за метательное действие:

$$Q = \frac{D^2}{2(k^2 - 1)}, \quad (6.6)$$

где k – показатель политропы продуктов детонации;

D – скорость детонации ВВ.

β_1 и β_2 – коэффициенты нагрузки пластин:

$$\beta_1 = \frac{\rho_{\text{ВВ}} h}{\rho_{\text{пл}} \delta_1}; \quad \beta_2 = \frac{\rho_{\text{ВВ}} h}{\rho_{\text{пл}} \delta_2}, \quad (6.7)$$

где $\rho_{\text{пл}}$ – плотность материалов метаемых пластин (предполагается, что пластины изготовлены из одного материала);

$\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность метаемого заряда ВВ.

Для анализа начальной стадии взаимодействия КС с ЭДЗ необходимо учесть время разгона лицевой и тыльной пластин τ_{p1} и τ_{p2} . Особенно это важно для определения длины лидера КС, проникающего через ЭДЗ. При метании тонких пластин скользящей детонационной волной, как это имеет место в ЭДЗ, время разгона пластины можно оценить предполагая, что ускорение пластины постоянно. Тогда при известной конечной скорости пластин получим следующие соотношения:

$$\tau_{p1} = \frac{\rho_{\text{пл}} \delta_1 U_1}{p_n}; \quad \tau_{p2} = \frac{\rho_{\text{пл}} \delta_2 U_2}{p_n}, \quad (6.8)$$

где p_n – нормальное давление детонации:

$$p_n = 2(k-1)\rho_{\text{BB}}Q, \quad (6.9)$$

Ускоренные пластины поворачиваются относительно первоначального положения на углы, соответственно равные

$$\gamma_1 = 2 \arcsin\left(\frac{U_1}{2D}\right); \quad \gamma_2 = 2 \arcsin\left(\frac{U_2}{2D}\right). \quad (6.10)$$

4. Взаимодействие движущихся пластин с кумулятивной струей. Механизм взаимодействия КС с движущимися пластинами весьма сложен и характеризуется трехмерными нестационарными динамическими процессами срабатывания, отклонения и разрушения КС. Точка K пересечения КС с пластинами (рисунок 11) перемещается вдоль КС со скоростью U_{xi} (ось x направлена вдоль КС). В системе координат, связанной с этой точкой, взаимодействие КС с пластинами эквивалентно слиянию двух потоков, направленных вдоль КС и пластин.

Скорости потоков элементов КС:

$$U_{\text{KC1}i} = v_{\text{KC}i} + \frac{U_1}{\cos\theta}; \quad U_{\text{KC2}i} = v_{\text{KC}i} - \frac{U_2}{\cos\theta}. \quad (6.11)$$

Скорость потоков пластин:

$$U_{\text{пл1}} = U_1 \operatorname{tg} \theta; \quad U_{\text{пл2}} = U_2 \operatorname{tg} \theta. \quad (6.12)$$

Режим взаимодействия КС с пластинами определяется соотношением потоков масс элементов КС $m_{\text{KC1}i}$, $m_{\text{KC2}i}$ и соответствующих элементов пластины $m_{\text{пл1}i}$, $m_{\text{пл2}i}$ в точке K . Для потоков масс можно записать следующие выражения:

$$m_{\text{KC1}i} = \frac{\pi d_{\text{KC}i}^2}{4} \rho_{\text{KC}} v_{\text{KC1}i}; \quad m_{\text{KC2}i} = \frac{\pi d_{\text{KC}i}^2}{4} \rho_{\text{KC}} v_{\text{KC2}i}. \quad (6.13)$$

$$m_{\text{пл1}i} = \delta_1 d_{\text{KC}i} \rho_{\text{пл}} U_{\text{пл1}}; \quad m_{\text{пл2}i} = \delta_2 d_{\text{KC}i} \rho_{\text{пл}} U_{\text{пл2}}. \quad (6.14)$$

Отношение потоков масс для пластин:

$$\lambda_{1i} = \frac{m_{\text{KC1}i}}{m_{\text{пл1}i}}; \quad \lambda_{2i} = \frac{m_{\text{KC2}i}}{m_{\text{пл2}i}}. \quad (6.15)$$

Экспериментальное исследование взаимодействия КС с ДЗ показывает, что при $\lambda_i > 1$ реализуется стационарное непрерывное взаимодействие КС с пластиной, в результате которого КС, частично срабатываясь, уменьшаясь в диаметре и отклоняясь по направлению, перерезает пластину. При этом изменяется форма поперечного сечения – КС расширяется в боковом направлении. Как правило, стационарный режим реализуется при взаимодействии высокоскоростных элементов КС как с лицевой, так и с тыльной пластинами ДЗ. Низкоскоростные элементы КС в стационарном режиме взаимодействуют только с достаточно тонкими лицевыми пластинами ДЗ, движущимися навстречу КС. Анализ рентгенограмм показывает, что влияние лицевых пластин ДЗ на КС приводит к ее преждевременному разрушению.

При $\lambda_i < 1$ поток массы пластины в точке взаимодействия превосходит поток массы КС и режим взаимодействия оказывается нестационарным: КС периодически взаимодействует с пластиной и образует в ней отверстия – каждое очередное взаимодействие реализуется при столкновении КС с краем предыдущего отверстия в пластине, которое смещается на траекторию КС вследствие ее движения. В результате часть КС расходуется на пробитие пластины, а оставшаяся возмущенная часть проникает через пластину и воздействует на основную преграду. Нестационарный режим характерен для взаимодействия КС с тыльной пластиной, перемещающейся в направлении движения КС.

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем),

представленных в таблице 6.1.

2. Опираясь на расчетные значения практического занятия 5 ($\rho_{КСi}$, $d_{КСi}$, $\nu_{КСi}$, $\nu_{при}$) определить характеристики функционирования элементов динамической защиты по формулам (6.1) – (6.15). Для пластин в качестве материала принять сталь с плотностью $\rho_{пл} = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 6.1 – Исходные данные

Вариант	θ , град.	δ_1 , мм	δ_2 , мм	h , мм	$\sigma_{ТД}$, МПа	k	$\rho_{ВВ}$, г/см ³	D , км/с
1	60	3,0	3,0	4,0	500	3,1	1,55	6,90
2	63	3,5	3,5	4,0	520	3,0	1,60	7,05
3	65	3,2	3,6	4,5	490	2,9	1,65	7,25
4	68	4,0	4,0	5,5	485	3,0	1,62	7,19
5	70	3,5	4,0	5,0	505	3,2	1,58	7,01
6	62	3,2	3,0	4,5	510	3,1	1,52	6,85
7	64	4,2	4,5	6,0	495	3,0	1,66	7,27
8	59	3,3	3,5	5,6	515	2,9	1,61	7,10
9	66	3,5	3,5	4,8	505	3,0	1,68	7,30
10	67	3,0	3,5	4,0	510	3,2	1,54	6,95
11	63	3,2	3,2	4,2	500	3,1	1,57	6,99
12	69	3,6	4,0	5,0	510	2,9	1,53	6,92

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СНАРЯДОФОРМИРУЮЩИХ ЗАРЯДОВ

Содержание занятия

Средства поражения с использованием ударного ядра – это разновидность кумулятивных СП. Иногда их называют боеприпасами со взрывоформируемым снарядом EFP (Explosively Formed Projectile), боеприпасами со снарядоформирующим зарядом (СФЗ), боеприпасами с самоформирующимся снарядом SFP (Self Formatting Projectile). Наиболее точно было бы называть эти БП кумулятивными боеприпасами точного прицеливания, формирующими дальнобойные ПЭ. Наиболее часто употребляемым является название «боеприпасы с использованием ударного ядра».

Формирование дальнобойных ПЭ – достаточно сложный процесс. Механизм формирования и параметры образуемых ПЭ зависят от формы, толщины и материала облицовки, типа и массы ВВ, конфигурации фронта детонационной волны, геометрии заряда, наличия корпуса и его толщины.

Среди многообразия механизмов формирования ПЭ можно выделить три основных: выворачивания (рисунок 12а), сворачивания (рисунок 12б) и натекания (рисунок 12в). Механизмы выворачивания и сворачивания чисто деформационные. Механизму же натекания, напротив, свойственно проявление гидродинамических эффектов.

В зависимости от конструктивных параметров СФЗ при формировании ПЭ может реализовываться один из указанных основных механизмов. Однако чаще всего режимы формирования сочетают в себе три основных механизма. Так, процесс формирования компактного ПЭ из медных и стальных конических облицовок малого прогиба реализуется через механизмы выворачивания (при больших углах) и натекания (при меньших углах). Компактный элемент также образуется посредством выворачивания и натекания, но уже при доминировании процесса натекания, а процесс формирования компактного ПЭ из комбинированной сегментной облицовки в соответствии с результатами численного моделирования проходит посредством чисто деформационных механизмов – выворачивания на начальной стадии и сворачивания на завершающей. Следует отметить, что образование представляющих наибольший интерес с точки зрения повышения бронепробития удлиненных ПЭ с относительным удлинением $l_{ПЭ}/d_{ПЭ} > 4$ осуществляется, как правило, с помощью чисто деформационных механизмов выворачивания или сворачивания. При этом в основном используют сегментные облицовки малого прогиба, приосевая часть которых перпендикулярна оси, что позволяет при взрывном нагружении сообщать ей лишь осевую составляющую скорости и исключать проявление эффектов натекания и последующего формирования центрального стержня.

Функционирование СФЗ – весьма сложный процесс, в котором выделяют четыре характерных этапа. Первым этапом является взрывное нагружение кумулятивной облицовки (КО) и ее ускорение под действием продуктов детонации заряда ВВ. Второй этап – это инерционное деформирование облицовки, сопровождающееся диссипацией энергии за счет работы деформации и приводящее к образованию безградиентного компактного, удлиненного или же фрагментированного ПЭ. Третий этап связан с движением сформированного ПЭ по траектории. Заключительный четвертый этап – взаимодействие ПЭ с преградой, сопровождающееся интенсивным деформированием и разрушением как самого элемента, так и преграды при вовлечении в эти процессы массы преграды, в несколько раз превышающей массу ПЭ.

Сложность процессов динамического деформирования элементов СФЗ, экстремальность условий, в которых происходят формирование ПЭ и его взаимодействие с преградой, отсутствие достоверной информации о физико-механическом поведении металлов в этих условиях – все это объективно обуславливает то обстоятельство, что в настоящее время не существует надежных методов расчета функционирования СФЗ. Даже

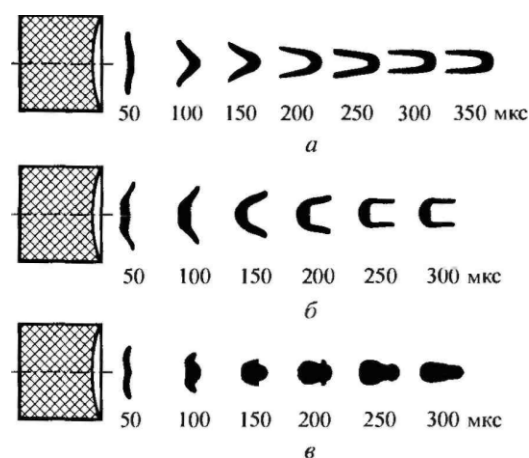


Рисунок 12 – Основные механизмы формирования ПЭ снарядоформирующим зарядом (время отсчитывается от момента подрыва заряда): а) – выворачивание; б) – сворачивание; в) – натекание

имея полное представление об облике СФЗ (размеры КО и заряда ВВ, тип ВВ, характер инициирования заряда), априорно невозможно надежно и достоверно предсказать для изменяющихся в широком диапазоне конструктивных параметров СФЗ не только результат действия по бронепреграде, но даже форму и тип формируемого ПЭ (компактный, удлинненный или фрагментированный). Поэтому основным методом при разработке новых конструкций СФЗ на сегодня остается метод экспериментального исследования – проведение лабораторных и натурных испытаний с использованием импульсной рентгенографии.

Тем не менее, существуют методы расчета функционирования СФЗ, в том числе приближенная оценка параметров формируемого СФЗ поражающего элемента и его действия по бронепреграде. Такая оценка может быть проведена с помощью инженерных методов расчета.

Определение начальных скоростей метания КО осуществляется по зависимости, известной из физики взрыва:

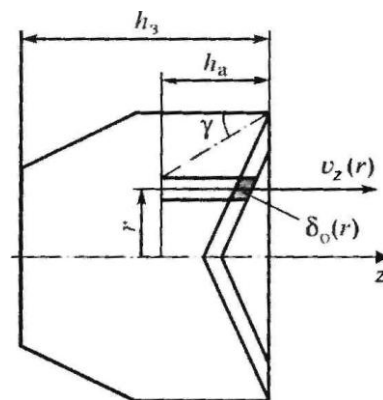


Рисунок 13 – К расчету скорости метания облицовки СФЗ

$$v_z(r) = 0,345D \sqrt{\frac{3\beta(r)}{3+\beta(r)}}, \quad (7.1)$$

где $v_z(r)$ – осевая составляющая скорости метания облицовки для ее элемента, расположенного на расстоянии r от оси z СФЗ (рисунок 13);

D – скорость детонации заряда ВВ;

$\beta(r)$ – коэффициент нагрузки:

$$\beta(r) = \frac{h_a(r)\rho_{ВВ}}{\delta_o(r)\rho_{ПЭ}}, \quad (7.2)$$

$h_a(r)$ – высота активной части заряда на расстоянии r от оси;

$\delta_o(r)$ – толщина облицовки;

$\rho_{ВВ}$ и $\rho_{ПЭ}$ – плотности ВВ и ПЭ (облицовки) соответственно.

Высота активной части заряда h_a не превышает $4/9$ высоты заряда h_3 и ограничена боковой конической поверхностью с углом конусности $\gamma = \arctg 0,5 = 26,6^\circ$. Первое ограничение вытекает из особенностей одномерного осевого разлета продуктов детонации (ПД) при распространении детонационной волны по заряду ВВ. Второе учитывает влияние на разлет ПД волны разрежения, распространяющейся со скоростью $D/2$ с боковой поверхности и обеспечивающей разлет части ПД в радиальном направлении.

Вследствие влияния боковой волны разрежения и формы облицовки формируемое при взрывном нагружении поле скоростей неоднородно и характеризуется распределением по радиальной координате осевой составляющей скорости движения $v_z(r)$. Скорость же образуемого в итоге ПЭ (для случая целостного ПЭ) можно определить с использованием формулы (6.1) в пред-

положении малого влияния ПД на этапе инерционного деформирования и выполнения закона сохранения импульса:

$$v_{\text{ПЭ}} = \frac{1}{m_{\text{ПЭ}}} \int_r v_z(r) dm(r), \quad (7.3)$$

где $m_{\text{ПЭ}}$ – масса ПЭ (в первом приближении ее можно считать равной массе всей облицовки).

Бронепробивное действие сформированного взрывом ПЭ приближенно рассчитывается по законам пробития преград компактными ударниками. Глубина пробиваемого кратера в полубесконечной преграде находится из условия равенства кинетической энергии ПЭ энергии вытеснения материала в объеме кратера:

$$L = \left(\frac{3m_{\text{ПЭ}}}{\pi H_d k_\phi^2} \right)^{1/3} v_{\text{ПЭ}}^{2/3}, \quad (7.4)$$

где H_d – динамическая твердость, принимаемая в качестве удельной энергии вытеснения материала (для брони средней твердости $H_d = 4,0 \dots 4,4$ ГПа),

k_ϕ – экспериментальный коэффициент, определяющий форму кратера и равный отношению его диаметра $d_{\text{отв}}$ к глубине L , $k_\phi = d_{\text{отв}}/L = 1,6 \dots 1,7$.

В связи с объемным характером взаимодействия ПЭ с преградой и мощным проявлением откольных эффектов толщина пробиваемой насквозь преграды конечной толщины несколько больше, чем глубина кратера в полубесконечной преграде. С достаточной для практики точностью зависимость толщины пробиваемой брони от скорости $v_{\text{ПЭ}}$ и массы $m_{\text{ПЭ}}$ можно оценить по эмпирической формуле

$$b_{\text{пред}} = (1 + 0,15v_{\text{ПЭ}})L, \quad (7.5)$$

где $v_{\text{ПЭ}}$ – в км/с.

Обобщенный опыт разработки дальнобойных СФЗ позволяет установить взаимосвязь диаметра заряда d_3 , плотности материала КО $\rho_{\text{ПЭ}}$ и массы ПЭ $m_{\text{ПЭ}}$:

$$m_{\text{ПЭ}} = (0,03 \dots 0,04) \frac{\pi d_3^3}{4} \rho_{\text{ПЭ}}. \quad (7.6)$$

Эта оценочная формула получена в предположении, что масса формируемого из облицовки малого прогиба ПЭ близка к массе самой облицовки, а последняя – к массе круглой пластины с диаметром d_3 и толщиной $\delta_0 = (0,03 \dots 0,04)d_3$, характерной для облицовок СФЗ.

Для образования неразрушающегося ПЭ необходим правильный выбор геометрических параметров облицовки и заряда ВВ. Опытным путем установлены критерии, обеспечивающие целостность метаемых элементов для ряда частных случаев. Например, медные компактные поражающие элементы формируются СФЗ со следующими параметрами: толщина облицовки $\delta_0 = (0,03 \dots 0,04)d_3$, прогиб $h_0 = 0,1d_3$, угол раствора конуса $2\alpha = 150 \dots 160^\circ$, высота заряда $h_3 = (0,6 \dots 1,5)d_3$, скорость ПЭ порядка $0,25 \dots 0,35$ от скорости детонации заряда ВВ, масса до $70 \dots 90\%$ от массы облицовки, диаметр $d_{\text{ПЭ}} = (0,3 \dots 0,6)d_3$ и длина $l_{\text{ПЭ}} = (0,9 \dots 0,4)d_3$. Расстояние, на котором завершается формирование поражающего элемента, составляет $(10 \dots 15)d_3$.

Порядок проведения занятия

1. Выбрать один из вариантов практического задания (по согласованию с преподавателем), представленных в таблице 7.1.

2. По исходным данным разработать конструкцию СФЗ с медной КО (рисунок 14а), установив массы: всего заряда, активной части, кумулятивной облицовки ($m_{\text{ПЭ}}$).

3. Разбить СФЗ на кольцевые фрагменты (5 штук) согласно рисунку 14б, задавшись несколькими значениями радиуса r (5 штук). Геометрию конической активной части заряда построить с учетом угла $\gamma = \arctg 0,5 = 26,6^\circ$ (рисунок 13).

4. Определить высоты активной части заряда $h_a(r)$ для каждого кольцевого фрагмента и массы фрагментов кумулятивной облицовки $dm(r)$.

5. По формулам (7.1) – (7.5) рассчитать основные параметры функционирования ударного ядра. Сравнить массу спроектированного ударного ядра с оптимальным значением, рассчитанным по формуле (7.6).

Таблица 7.1 – Исходные данные для расчета параметров функционирования ударного ядра

Вариант	d_3 , мм	$\rho_{ВВ}$, г/см ³	D , км/с	$\rho_{ПЭ}$, г/см ³	H_d , ГПа
	70	1,25	6,66	8,92	4,0
2	95	1,30	6,88	8,85	4,1
3	145	1,40	7,32	8,90	4,2
4	80	1,65	4,40	8,91	4,3
5	120	1,20	6,30	8,86	4,4
6	110	1,40	7,10	8,88	4,0
7	72	1,60	7,90	8,89	4,1
8	84	1,50	7,69	8,91	4,2
9	140	1,54	7,35	8,92	4,3
10	94	1,59	6,90	8,93	4,4
11	120	1,40	7,10	8,90	4,0
12	135	1,60	7,90	8,87	4,1

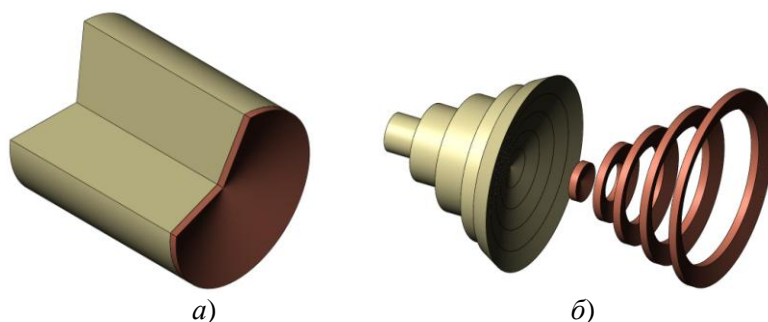


Рисунок 14 – Цилиндрический СФЗ: а) исходная конструкция; б) разбивка на кольцевые сечения с активной частью заряда

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Средства поражения и боеприпасы: учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.
2. Запорожец, В.И. Боевая эффективность средств поражения и боеприпасов: тексты лекций /В.И. Запорожец; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2006. – 159 с.
3. Губин, С.Г. Эффективность стрельбы из вооружения боевых машин и стрелкового оружия [Текст]: учеб. пособие / С.Г. Губин. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 158 с.
4. Фендриков, Н.М. Методы расчетов боевой эффективности вооружения / Н.М. Фендриков, В.И. Яковлев В.И. – М., Воениздат, 1971. – 224 с.

Учебное издание

Беляев Вячеслав Анатольевич

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

Методические рекомендации по проведению практических занятий
и организации самостоятельной работы студентов
специальности 17.05.01 – Боеприпасы и взрыватели

Подписано в печать 09.04.2021. Формат 60×84 1/8.
Усл. п. л. 3,95. Тираж 50 экз. Заказ 2021-199
Печать – ризография, множительно-копировальный
аппарат «RISO EZ300».

Издательство Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова.
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.

Оригинал-макет подготовлен на кафедре
РДВУАС БТИ АлтГТУ.
Отпечатано в ОИТ БТИ АлтГТУ.
659305, г. Бийск, ул. имени Героя Советского
Союза Трофимова, 27.