

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ШОСТКИНСЬКИЙ ІНСТИТУТ**

В. І. Онда

ВНУТРІШНЯ БАЛІСТИКА

Конспект лекцій

Суми
Сумський державний університет
2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ШОСТКИНСЬКИЙ ІНСТИТУТ

ВНУТРІШНЯ БАЛІСТИКА

Конспект лекцій

для студентів спеціальності
161 «Хімічні технології та інженерія»

Затверджено
на засіданні кафедри
хімічної технології
високомолекулярних сполук
як конспект лекцій із дисципліни
«Внутрішня балістика».
Протокол № 6 від 14.02.2017 р.



Суми
Сумський державний університет
2018

Внутрішня балістика : конспект лекцій / укладач В. І. Онда.
– Суми : Сумський державний університет, 2018. – 134 с.

Кафедра хімічної технології високомолекулярних сполук
ШІ СумДУ

Тема 1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН І ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ	10
1.1. Відомості з історії винаходу і застосування вибухових речовин	10
1.2. Відомості з історії розвитку внутрішньої балістики	14
1.3. Позначення, прийняті у внутрішній балістиці	18
Тема 2. ТЕРМІНИ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПОЛОЖЕН- НЯ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ	21
2.1. Основні терміни	21
2.2. Основні особливості пострілу зі ствольної зброї	22
2.3. Конструкція вогнепальної зброї	26
2.3.1. Стовбур	26
2.3.2. Калібр і запірний пристрій	28
2.3.3. Ударні та спускові механізми	29
2.3.4. Механізм вилучення і видалення гільз	30
2.3.5. Приціли і запобіжники	31
Тема 3. ПОРОХ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ	31
3.1. Класифікація вибухових речовин	32
3.2. Фізико-хімічні характеристики порохів	33
3.3. Балістичні характеристики порохів	35
3.4. Щільність заряджання. Гравіметрична щільність	36
3.5. Характеристики форми	36
3.6. Основні фази процесу горіння пороху	37
Тема 4. ЗАКОНИ ГОРІННЯ ПОРОХУ Й УТВОРЕННЯ ГАЗІВ	38
4.1. Закони горіння пороху	38
4.2. Закон швидкості горіння пороху	39
4.3. Швидкість газоутворення	43
4.4. Зв'язок між геометрією пороху і утворенням газів	45
4.5. Двучленні залежності для порохів дегресивної форми	50
4.6. Особливості горіння порохів прогресивної форми	51
4.6.1. Порох із сімома каналами	51
4.6.2. Зерно Уолша	53

4.6.3. Зерно Кіснемського	54
4.7. Визначення характеристик порохів прогресивної форми	55
4.8. Фізичний закон горіння пороху	56
4.9. Застосування дослідної характеристики G_{on} для аналізу горіння порохів	59
4.9.1. Аналіз горіння порохів з простою формою зерна	59
4.9.2. Аналіз горіння прогресивних порохів	60
Тема 5. ГОРІННЯ ПОРОХУ В ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ	61
5.1. Манометрична бомба	62
5.2. Горіння пороху в постійному об'ємі	63
5.3. Зв'язок між тиском і умовами заряджання при згорянні пороху в постійному об'ємі	64
5.4. Загальна формула піростатики	66
5.5. Облік впливу запальника на тиск газів	68
5.6. Облік теплообміну в бомбі В'єля	69
5.7. Балістичний аналіз порохів за експериментами в манометричній бомбі	73
Тема 6. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЯВИЩА ПОСТРІЛУ ДО ВИЛЬОТУ СНАРЯДА З КАНАЛУ СТВОЛА	75
6.1. Поняття про наведену довжину камори	75
6.2. Періоди явища пострілу	76
6.3. Рівняння балансу енергії при пострілі	79
6.4. Рівняння стану порохових газів для змінного об'єму	82
6.5. Основні енергетичні характеристики пострілу	84
6.6. Вираз для коефіцієнта фіктивності маси снаряда	89
Тема 7. ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ І МЕТОДИ ЇХ РІШЕННЯ	90
7.1. Задачі внутрішньої балістики	90
7.2. Методи розв'язання прямої задачі внутрішньої балістики	92
7.3. Аналітичний метод рішення ОЗВБ	95
7.3.1. Фізична модель процесу пострілу	95
7.3.2. Математична модель процесу пострілу	96
7.4 Чисельний метод рішення ОЗВБ	98
7.4.1 Метод Рунге-Кутта	99

Тема 8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА БАЛІСТИКА.	
МЕТОДИ БАЛІСТИЧНИХ ВИМІРІВ	100
8.1. Значення експериментальних досліджень у балістиці.	100
8.2. Зміст експериментальної балістики	102
8.3. Вимір тиску порохових газів.	103
8.3.1. Метод пластичних деформацій	105
8.3.2. Методика застосування кресерів для вимірювання тиску	109
8.3.3. П'єзоелектричний метод	111
8.3.4. Тензометричний метод	116
8.3.4.1. Електрична схема тензоіндикатора	120
8.3.4.2. Конструкція тензоманометрів	122
8.3.4.3. Реєструюча апаратура	123
8.4. Вимір швидкості снаряда	125
8.4.1. Рам-мішений метод	126
8.4.2. Соленоїдне блокування	127
8.4.3. Індукційні вимірювачі швидкості	129
8.4.4. Фотоелектронне блокування	129
8.4.5. Оптичні вимірювачі швидкості	129
8.4.6. Доплерівські локатори вимірювання швидкості снарядів	131
8.4.7. Високошвидкісна кінозйомка	132

Шановні студенти!

Пропонуємо вам для вивчення курс внутрішньої балістики, адаптований до вимог обраної вами спеціальності. Сподіваємося, що ви усвідомлюєте важливість успішного оволодіння комплексом знань, необхідних для успішної професійної діяльності.

Балістика – це наука про рух куль і снарядів, випущених із стрілецької зброї при пострілі.

Для успішного оволодіння техніки стрільби з будь-якої стрілецької зброї, необхідно добре засвоїти знання законів балістики і ряду основних пов'язаних з нею понять. Знання цієї дисципліни необхідно і для глибокого розуміння фізичної сутності процесів, що відбуваються при пострілі з авіаційної артилерійської зброї та роботі ракетних двигунів, для побудови математичних моделей зазначених систем із метою їх дослідження та оцінювання ступеня досконалості, а також для здійснення грамотної експлуатації.

Залежності, які встановлює внутрішня балістика, дозволяють вирішувати практичні завдання про раціональні умови заряджання, що забезпечують надання снаряду даної ваги та калібру певної дульної швидкості; завдання про раціональний устрій системи снаряд-заряд-ствол, що забезпечує найкраще задоволення балістичних вимог, які пред'являються до артилерійського знаряддя.

Інженер-технолог повинен чітко уявляти, що може дати той чи інший порох у знарядді, які зміни необхідно внести в порох, щоб змінити швидкість снаряда і тиск у необхідний бік.

При вивченні явищ внутрішня балістика ґрунтується на наступних дисциплінах.

У зв'язку з тим, що порох – метальна вибухова речовина, теорія вибухових речовин дає вихідні дані для внутрішньої балістики (фізико-хімічні характеристики, реакції при горінні пороху, при цьому балістичні характеристики є похідними фізико-хімічних).

Технологія пороху взаємодіє з внутрішньою балістикою: в процесі виробництва порох акумулює енергію, яка

витрачається при пострілі; різні процеси виробництва можуть впливати на характер газоутворення при горінні.

Термодинаміка. При вирішенні завдань внутрішньої балістики застосовуються рівняння стану газів, робіт, що здійснюються ними, перетворення теплової енергії в кінетичну і т. д.

При пострілі має місце рух частин системи під дією внутрішніх сил, основні теореми механіки також застосовуються при вирішенні завдання внутрішньої балістики.

Крім того необхідно вміти застосовувати не лише математичний апарат у вигляді формул, а й уміти раціонально зробити обчислення.

Мета і завдання дисципліни

Програма розрахована на вивчення основних закономірностей процесу вогнепального метання, що відбувається в середині ствола; на створення правильних уявлень про роботу порохів газів при вимушеному переміщенні снаряда по каналу ствола; на ознайомлення із сучасними прийомами проектування металевих порохів зарядів за типовим завданням створення стрілецької та артилерійської зброї.

Предметом дослідження внутрішньої балістики є закономірності взаємодії елементів системи «ствол + снаряд + пороховий заряд» при різних умовах підзарядки.

Метою дослідження внутрішньої балістики є досягнення найбільш вигідних умов заряджання для заданих конструкцій ствола і снаряда.

Методом дослідження внутрішньої балістики є чисельний аналіз фізичної та математичної моделей стадії метання в середині ствола на основі активного використання сучасної обчислювальної техніки, проведення лабораторного експерименту, дослідної стрільби на полігоні.

Основна мета курсу – введення студентів у предмет дослідження внутрішньої балістики, набуття ними навичок практичної реалізації методу дослідження внутрішньої балістики для досягнення конкретної цільової установки.

У результаті вивчення курсу «Внутрішня балістика» студент повинен ЗНАТИ:

- цілі і завдання дисципліни;
- історію розвитку засобів і способів метання;
- прийняті в балістиці типові позначення і терміни;
- типову конструкцію нарізної зброї;
- перелік фізико-хімічних і балістичних характеристик пороху;
- основні фази процесу горіння пороху;
- призначення та будову манометричної бомби;
- основні закони горіння пороху;
- суть закону швидкості горіння пороху;
- фізичну інтерпретацію загальної формули піростатики;
- фізичну суть коефіцієнта фіктивності маси снаряда;
- характер розподілу тиску в заснарядному просторі;
- типи інтегральних діаграм;
- фізичну суть кожного з періодів явища пострілу;
- написання і фізичну суть рівнянь явища пострілу;
- смисловий зміст і правильне написання основного рівняння піростатики;
- перелік і суть основних енергетичних характеристик пострілу;
- мотивацію існування і розвитку експериментальних досліджень у балістиці;
- прийоми вимірювання тиску порохових газів у стволі гармати і манометричній бомбі;
- методи вимірювання швидкості снаряда на дуловому зрізі ствола.

У результаті вивчення курсу «Внутрішня балістика» студент повинен УМІТИ:

- відрізнити основну задачу внутрішньої балістики від оберненої задачі внутрішньої балістики;
- графічно інтерпретувати основні особливості пострілу зі ствольної зброї;
- розраховувати характеристики форми для конкретного пороху;

- показати зв'язок між геометрією пороху і утворенням газів у вигляді тричленної формули;
- застосовувати загальну формулу піростатики;
- практично здійснювати дослідження в манометричній бомбі;
- зробити балістичний аналіз пороху за дослідженнями в манометричній бомбі;
- застосовувати інтегральні криві для визначення коефіцієнта швидкості горіння і для встановлення закону швидкості горіння;
- представляти справжню і приведену довжину камори;
- розрізняти за математичною моделлю той чи інший період явища пострілу;
- давати порівняльну оцінку балістичних властивостей ствольної системи на основі конкретних значень основних енергетичних характеристик пострілу;
- підготувати вихідні дані для вирішення ОЗВБ;
- виконувати практичний розрахунок ОЗВБ чисельним методом за допомогою ЕОМ та спеціалізованої обчислювальної програми;
- здійснювати аналіз одержаних при чисельному розрахунку результатів пострілу в контексті оцінки балістичних властивостей металюного заряду;
- виконувати тарування датчика тиску і одержувати аналітичну форму тарувальної кривої;
- розрізняти поняття дулова, початкова, максимальна швидкість снаряда і середня швидкість снаряда на заданому видаленні від дульного зрізу ствола.

Бажаємо вам успіху!

Тема 1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН І ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ

План

- 1.1. Відомості з історії винаходу і застосування вибухових речовин.
- 1.2. Відомості з історії розвитку внутрішньої балістики.
- 1.3. Позначення, прийняті у внутрішній балістиці.

1.1. Відомості з історії винаходу і застосування вибухових речовин

Першою відомою в історії вибуховою речовиною був димний порох, який складається з суміші селітри, вугілля і сірки. Появу пороху в Європі відносять до початку XIV століття. Тривалий час існувала думка, що порох був винайдений у Німеччині ченцем Бертольдом Шварцем. Однак його винахід відноситься до більш раннього періоду. При розведенні багать на ґрунті були помічені спалахи, що утворюються при змішуванні селітри з вугіллям від вогнищ. Цим можна пояснити, що суміш селітри з вугіллям вже в перших століттях до нашої ери використовувалася в Китаї як запальний склад, а також для складання «потішних вогнів». Є підстави вважати, що від китайців та індійців застосування запалювальних сумішей перейшло до аравітян (вони називали селітру китайською сіллю, китайським снігом), а від них в VII столітті нашої ери – до греків.

В Європі запальні суміші одержали назву грецького вогню. На початку XIV століття, коли в Європі з'явилася вогнепальна зброя, тобто коли почали користуватися метальною дією пороху, назва «грецькі вогні» вже не зустрічається в літописах. Вважають, що грецький вогонь був досить близький до пороху і поступово перейшов у порох. У літописах Росії порох як метальний засіб згадується в 1382 р. У 1389 р. порох в артилерії широко використовував Дмитро Донський.

У 1494 р. в Росії був створений перший пороховий завод. Порох спочатку за своїм складом був дуже далекий від сучасного: селітру, вугілля і сірку змішували в рівних

кількостях, він не піддавався зерненню, для стрільби використовували м'якоть.

Найбільш доцільний склад пороху розробив Михайло Васильович Ломоносов (1711–1765 рр.). Запропонований ним склад містив 75 % селітри, 15% вугілля і 10 % сірки. У своїх працях «Дисертація про народження і природу селітри» і «Про природу пороху» Ломоносов дав наукові тлумачення порохоробства, вказівки про вдосконалення порохового виробництва, застосування порохів, дослідження вибухової сили і т. д.

Після відкриттів Ломоносова російська порохова промисловість розвивалася на науковій основі і не лише йшла в ногу з зарубіжною, але часто і випереджала її. У другій половині XVIII століття виникає потреба в більш потужному і якісному поросі, ніж існуючий тоді чорний порох. Він не задовольняв війська з ряду причин: при пострілі він давав густу чорну хмару диму, яка демаскувала стріляючих і закривала від них поле бою; залишав в стовбурі більше 50 % своєї ваги у вигляді нагару; поява більш якісних артилерійських стволів вимагала пороху більшої потужності.

Першу спробу в цьому напрямку робить французький хімік Бертолле у зв'язку з відкриттям їм в 1786 р. хлорноватої кислоти і її солей, які потім стали називати бертолетовою сіллю. Він намагався приготувати порох із суміші бертолетової солі, вугілля і сірки. Однак кілька непередбачених вибухів з важкими людськими жертвами змусили його припинити досліди.

У XIX столітті роботи з вибуховими речовинами проводилися вже на основі досягнень природничих наук. Відкриття нітроклітковини призвело до винаходу бездимного пороху, а нітрогліцерину – до відкриття явища детонації і бризантних вибухових речовин. Історія розроблення та застосування вибухових речовин у народному господарстві і у військових цілях у Росії нерозривно пов'язана з іменами російських вчених М. М. Зініна, А. А. Фадєєва, З. В. Калачова, Д. І. Менделєєва, Л. Н. Шишкова, С. В. Панпушко, Г. П. Кіснемського та багатьох інших.

Зінін Микола Миколайович (1812–1895 рр.) академік, хімік-органік, який працював у співдружності з відомим артилеристом В. Ф. Петрушевським, у 1842 р. відкрив спосіб перетворення нітробензолу в анілін, який є вихідним продуктом для одержання багатьох вибухових речовин. У 1853 р. Зінін застосовує для спорядження снарядів нітрогліцерин, а Петрушевський вперше одержує нітрогліцерин фабричним способом. У короткий термін ним було виготовлено близько 3000 кг нітрогліцерину. До цього нітрогліцерин одержували лише лабораторним шляхом.

Серед імен вчених, що займалися питаннями вибухових речовин, необхідно назвати ім'я викладача Михайлівського артилерійського училища Олександра Олександровича Фадеєва (1810–1895 рр.). Він винайшов спосіб тривалого та безпечного зберігання димного пороху шляхом додавання спеціальних домішок. До 1846 р. Фадеєв розробив і почав промислове виготовлення піроксиліну і очолив потім Охтинський пороховий завод.

Учень Фадеєва Леон Миколайович Шишков (1830–1909 рр.) у 50-х роках ХІХ століття дав аналіз продуктів горіння пороху і визначив температуру вибухового розкладання пороху.

Після багатьох невдач у 1884 р. французькому вченому В'єлю вдалося одержати бездимний піроксиліновий порох. Французи тримали цей винахід у строгій таємниці. У 1887–1888 рр. у багатьох країнах приступили до розробки бездимного пороху. У Росії, на Охтинському пороховому заводі, після наполегливих праць у кінці 1888 р. створюється зразок рушничного бездимного піроксилінового пороху. Доопрацьований зразок цього пороху наприкінці 1889 р. був дозволений для валового випуску. Цей порох був створений З. В. Калачовим.

Навесні 1890 р. військовим і морським міністерствами для якнайшвидшого вирішення питань бездимного порохоробства запрошується великий російський вчений Дмитро Іванович Менделєєв (1834–1907 рр.). Менделєєв після вивчення технології виготовлення бездимного пороху розробив

у 1891 р. новий тип нітроклітковини – піроколлодій, з якого виготовив піроколлоїдний порох.

Американці Бернадоу і Конвер, запозичивши винахід Менделєєва, в 1895 р. взяли патент на виготовлення піроколлоїдного пороху, видаючи його за своє відкриття.

До кінця XIX століття відносяться роботи ще кількох видатних російських порохоробів. Панпушко є початківцем російської споряджувальної справи, який дослідив питання про спорядження артилерійських снарядів мелінітом. Невтомним дослідником у галузі вибухових речовин був російський артилерист Гавриїл Петрович Кіснемський. Йому належить заслуга у виготовленні пороху прогресивного горіння, в розробці стабілізатора пороху – дифеніламіна.

Війни початку XX століття російсько-японська і Перша світова війна – зажадали колосальних витрат вибухових речовин. Із них велике значення придбали сурогатні вибухові речовини. Цей клас вибухових речовин був вперше вивчений і запропонований російським хіміком І. М. Чельцовим (1848–1904 рр.). Після Великої Жовтневої соціалістичної революції в Росії створилися сприятливі умови для розвитку вітчизняної науки і техніки. Великий внесок у подальшу розробку теорії та практики застосування вибухових речовин внесли Н. Т. Зверєв, А. В. Сапожников, С. П. Вуколов, Є. Г. Гронов, А. А. Дзержкович, В. І. Рдултовський. У 1927–1929 рр. розроблені зразки нового виду нітрогліцеринового пороху баліститного типу з введенням 1% вазеліну (НГВ). З 1929 до 1934 рр. вступили в дію кілька цехів і окремі заводи нітрогліцеринового пороху. Із 1934 р. у СРСР освоєна валова фабрикація нітрогліцеринового пороху (А. С. Бакаєв, Б. П. Фомін, А. Д. Артющенко та ін.). У 1935–1936 рр. був відпрацьований вітчизняний порох «НБ» для мінометних зарядів. У 1939–40 рр. розроблена серія «холодних» нітрогліцеринових порохів (НД), прийнятих у 1941 р. на озброєння армії.

У 1942–1946 рр. В. С. Тихоновичем і К. Г. Поповою розроблені нітрогліцеринові порохи підвищеної потужності для 7,62-мм гвинтівки і 14,5-мм протитанкової рушниці. У наступні

роки Л. В. Архангельський одержав потужний балістит для 7,62-мм патронів. Під час Другої світової війни виготовлялися в значних кількостях тен і гексоген. Інших нових вибухових речовин, за винятком декількох другорядних, не з'явилося.

1.2. Відомості з історії розвитку внутрішньої балістики

Балістика – наука про рух снаряда (від грецького слова «балло» – кидати, метати).

Історія балістики тісно пов'язана з історією розвитку артилерії. Ряд видатних учених, особливо математиків, займалися питаннями балістики ще до середніх віків. Італійський вчений Тарталья (XVI століття) написав працю «Питання і відкриття, що відносяться до артилерійської стрільби». Балістикою займалися такі видатні вчені, як Галілей, Торрічеллі, Мерсен, Ломоносов, Ейлер, Бернуллі.

Мерсен у 1644 р. запропонував назвати науку про рух снаряда балістикою. Як самостійна галузь науки, балістика одержала широкий розвиток з середини XIX століття. Балістика багатьом зобов'язана працям великих російських математиків Н. І. Лобачевського, П. Л. Чебишева, М. В. Остроградського, чудовим роботам вихованців Михайлівської артилерійської академії А. А. Фадєєва, Н. В. Майєвського, Н. А. Забудського, В. М. Трофимова, Н. Ф. Дроздова та ін.

Кінець XVII і початок XVIII століття були періодом, коли артилерія в більшості країн була остаточно введена до складу армій. Стали проводити в широких розмірах досліди з метою з'ясувати дію калібрів, відношення калібру до заряду, до довжини і вазі гармати, розподіл металу у гарматі, дальність пострілу, дію віддачі на лафети. У Росії багато уваги приділяв удосконаленню артилерії Петро I.

Нарівні з тактичними та організаційними удосконаленнями в артилерії йшов прогрес артилерійської науки, головним чином, у галузі вивчення польоту снаряда і опору повітря.

Бернуллі ввів у науку поняття про розширення газів внаслідок їх пружності і показав, як при врахуванні цього розширення розрахувати рух снаряда в каналі знаряддя.

Ейлер приділяв багато уваги вивченню процесів, що відбуваються в каналі знаряддя, але через відсутність у той час засобів для експериментального дослідження його роботи носили лише характер постановки питань.

Великим етапом у розвитку російської артилерії були 50-60 рр. XVIII ст., коли під керівництвом П. І. Шувалова був створений ряд нових артилерійських систем «єдиногогів», вдосконалено заряджання знарядь введенням картузів для зарядів і проведена нова організація артилерії.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, що заклали правильні уявлення про явище пострілу і його закономірності, були проведені, починаючи з другої половини XIX століття, на базі загального розвитку техніки і ряду суміжних дисциплін.

У середині XVII ст. Робінсом був запропонований перший прилад для визначення швидкості снаряда «балістичний маятник». Він вперше розділив балістику на внутрішню і зовнішню.

Перша теорія горіння пороху, опублікована в 1857 році за кордоном, була створена хіміками – російським Шишковим і німецьким Бунзенем. У 1860 р. А. П. Горлов написав статтю про рух в каналі нарізної зброї. У 1868 р. полковник Н. П. Федоров визначив вплив умов горіння пороху на склад продуктів.

Ці роботи стали підставою для розвитку правильних уявлень про горіння пороху при пострілі і були використані в більш пізніх роботах.

До 60-х років відноситься винахід двох основних приладів експериментальної балістики, широко застосовуваних до теперішнього часу, – хронографа Ле-Буланже для вимірювання швидкості снаряда (Бельгія) і крешера Нобеля для вимірювання тиску порохових газів (Англія).

Крешерний прилад, що дозволяє зі стиснення мідного стовпчика судити про тиск газів, поклав основу для розвитку спеціального розділу експериментальної балістики – манометрії і викликав появу манометричних бомб, які дали можливість вивчати закони горіння порохів при високому тиску.

У 1868–1875 рр. Нобль і Абель провели досліді зі спалювання в манометричній бомбі димних порохів, визначили якісний і кількісний склад продуктів горіння, їх теплоємності, кількості виділеної теплоти та температури горіння, а також залежність максимального тиску від сили пороху і щільності заряджання.

У 1864 році було введено диференційне рівняння, яким на основі першого закону термодинаміки встановлювався баланс енергії, що виділяється при горінні порохового заряду, і енергії, що витрачається на виробництво різних робіт (Резаль).

Французький дослідник Сарро в 1876 р. використовував це рівняння для вирішення завдань, що зустрічаються в артилерійській практиці; формули Сарро були основними робочими балістичними формулами майже у всіх країнах. У нас вони були замінені формулами Брінке, а потім формулами професора Дроздова.

Великий внесок у розвиток не лише внутрішньої балістики, але артилерії взагалі був зроблений винаходом бездимного пороху: піроксилінового пороху В'єля, нітрогліцеринового пороху Нобля і Абеля і піроколодійного пороху Менделєєва. Новий порох виявився майже в три рази сильніше димного і дав значне збільшення швидкості снаряда при меншому тиску порохових газів у каналі ствола.

У 1879 р. Альбіцький написав перший курс внутрішньої балістики в Росії.

Майєвський у 1985 році перед проектуванням 60-футової гладкостінної гармати задовго до дослідів Нобля створює оригінальний спосіб визначення тиску порохових газів у різних перетинах каналу ствола артилерійської гармати.

У 1987 році Н. В. Майєвський організував спеціальні досліді для експериментального визначення залежності шляху снаряда від часу, звідки розрахунковим шляхом були визначені криві тисків порохових газів залежно від шляху снаряда і від часу.

Н. А. Забудський дав ряд емпіричних формул для початкової швидкості і найбільшого тиску. Пізніше, в 1914 році, він опублікував велику роботу з експериментального

визначення кривих тиску і швидкостей у функції від шляху снаряда в каналі 3-дм польової гармати.

Початок ХХ століття ознаменувався в історії розвитку внутрішньої балістики роботами Н. Ф. Дроздова (1862–1954 рр.), який у 1903 р. вперше у світі мав точне рішення основної задачі внутрішньої балістики. У 1908 р. запропонував поділ внутрішньої балістики на основні відділи – піростатику і піродинаміку, уточнив поняття про тиск форсування і про облік другорядних робіт при пострілі. Піддавши критиці геометричний закон горіння, який розробив Вьель, він запропонував свій метод визначення закону горіння пороху за дослідями в манометричній бомбі: цей закон був використаний і при вирішенні основного завдання піродинаміки.

У 1920 р. він склав таблиці для визначення найбільших тисків і швидкостей снаряда в каналі ствола. Ці таблиці лягли в основу проектування артилерійських систем. У 1941 р. він опублікував працю «Рішення завдань внутрішньої балістики для бездимного пороху трубчастої форми». У 1947–1948 рр. були видані ще дві праці Дроздова: «Про властивості зрярядь найбільшої могутності» і «Про рішення завдання внутрішньої балістики для простого і комбінованого зарядів».

До видатних робіт передреволюційного періоду відноситься також праця І. П. Граве «Про горіння пороху в незмінному об'ємі» (1904 р.). У 1933–1936 рр. Граве, будучи начальником кафедри внутрішньої балістики в Артилерійській академії, створює багатотомний, найповніший у світі курс внутрішньої балістики.

Істотне значення для розвитку балістики мали роботи Г. П. Кіснемського і Г. П. Димші про поправочні формули внутрішньої балістики. За кордоном у цей час також велися роботи з конструювання гарматних систем і з балістики. З робіт цього періоду необхідно відзначити праці французьких учених Шарбоньє «Внутрішня балістика» (1908 р.), Мусюго «Курс внутрішньої балістики», німецьких балістиків Кранца, Шміца «Курс балістики», італійця Біанкі і ряду інших вчених.

Після Великої Жовтневої соціалістичної революції, з 1918 по 1926 рр., велася велика робота в Комісії особливих

артилерійських дослідів (Косартоп), якою керував В. М. Трофімов (1865–1926 рр.). До Комісії були залучені видатні вчені: А. Н. Крилов, С. А. Чаплигін, Н. Є. Жуковський. У Комісії були детально розроблені питання наддалекобійної стрільби (до 140 км), конструювання нових артилерійських систем, газодинаміки і внутрішньої балістики.

1.3. Позначення, прийняті у внутрішній балістиці

A – тепловий еквівалент роботи;

a – швидкість звуку в газах;

B – параметр заряджання професора Дроздова;

b – половина ширини стрічки (пластини) пороху;

C_m – мінлива Мюраура;

c – половина довжини порохового елемента;

C_w – теплоємність газів при постійному об'ємі;

C_p – теплоємність газів при постійному тиску;

D – діаметр;

D_0 – початкове значення зовнішнього діаметра порохового елемента;

d – калібр гармати;

d_0 – початкове значення діаметра порохового елемента;

e – товщина згорілого шару пороху в одному напрямку;

e_1 – половина початкової товщини палаючого зводу порохового елемента;

F – площа поперечного перерізу;

f – сила пороху;

G – секундна витрата газів (за масою);

i – імпульс тиску газів у знарядді (інтеграл кривої $p(t)$);

i^* , i_m^* , i^{**} – інтеграли кривої $p(l)$;

k – показник адіабати;

L_{nr} – довжина нарізної частини каналу ствола;

$L_{кан}$ – повна довжина каналу ствола, в тому числі затвор;

$L_{ст}$ – довжина ствола;

l – довжина шляху, пройденого снарядом у каналі ствола;

l_0 – довжина камори;

l_{ψ} – «довжина» вільного об'єму в заснарядному просторі каналу ствола;

M_0 – маса відкатних частин;

m – маса снаряда;

n – кількість каналів у пороховому елементі;

P_{ψ} , P_m – тиск газів у постійному замкнутому об'ємі;

$P_{дн}$ – тиск газів на дно камори знаряддя;

$P_{сн}$ – тиск газів на дно снаряда;

Q_1 – відносна площа поперечного перерізу зерна;

$Q_{жс}$ – кількість тепла, виділеного при згорянні 1 кг пороху при воді рідкої;

q – вага снаряда;

S – поверхня пороху;

S_1 – початкова поверхню пороху;

s – площа поперечного перерізу каналу ствола (з нарізами);

T – температура порохових газів;

T_1 – температура горіння пороху;

t – час;

t_k – тривалість процесу горіння;

U – швидкість течії (руху) газів;

u – лінійна швидкість горіння пороху;

u_1 – лінійна швидкість горіння пороху при 1 атм;

V – швидкість відкату ствола;

v – швидкість руху снаряда щодо каналу ствола;

v_a – абсолютна швидкість руху снаряда;

W – вільний об'єм камори;

W_0 – об'єм камори;

w – питомий об'єм порохових газів;

w_1 – питомий об'єм порохових газів при нормальних умовах (0 °С і 760 мм. рт. ст.);

z, z_k – відносна товщина згорілого шару пороху;

Π_1 – відносний периметр поперечного перерізу зерна;

α – коволюм порохових газів, а також відносний розмір палаючого зводу порохового елемента;

β – відносний розмір палаючого зводу порохового елемента;

Γ – функція прогресивності горіння пороху;

γ – питома вага порохових газів;

Δ – щільність заряджання;

δ – щільність пороху;

η_o – коефіцієнт заповнення площі індикаторної діаграми;

θ – коефіцієнт розширення газів;

$\kappa, \kappa_1, \kappa'_1, \kappa_2$ – характеристики форми порохового елемента;

Λ – відносна довжина пройденого снарядом шляху в каналі ствола;

$\lambda, \lambda_1, \lambda'_1, \lambda_2$ – характеристики форми порохового елемента;

μ_1 – характеристика форми порохового елемента;

ν – показник ступеня в законі горіння пороху;

ρ – щільність газів;

σ – відносна поверхня пороху;

φ – коефіцієнт фіктивності маси снаряда;

χ – коефіцієнт розширення камори;

ψ, ψ_s – відносна частина згорілої частини пороху;

ω – маса порохового заряду.

Тема 2. ТЕРМІНИ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ

План

- 2.1. Основні терміни.
- 2.2. Основні особливості пострілу зі ствольної зброї.
- 2.3. Конструкція вогнепальної зброї.
 - 2.3.1. Стовбур.
 - 2.3.2. Калібр і запірний пристрій
 - 2.3.3. Ударні та спускові механізми.
 - 2.3.4. Механізм вилучення і видалення гільз.
 - 2.3.5. Приціли і запобіжники.

2.1. Основні терміни

Артилерійський постріл – конструкція, що включає снаряд, металевий заряд і засіб займання в сукупності.

Металевий заряд – пристрій, що містить строго певну кількість одного або декількох порохів, зібраний у певному порядку і призначений для одного пострілу (процес + конструкція). Марки і наважки порохів підбирають балістичним розрахунком і стріляниною таким чином, щоб забезпечити досягнення необхідної початкової швидкості снаряда при встановленому для даної зброї максимальному тиску порохових газів.

Камора зброя – порожнина за снарядом перед пострілом.

Тиск форсування – тиск, при якому снаряд починає рухатися.

Дулова швидкість снаряда – швидкість снаряда при вильоті з каналу ствола.

Початкова швидкість снаряда – швидкість снаряда в кінці періоду післядії.

Ювенільний газ – газ, що відтікає від поверхні палаючого пороху в навколишній об'єм.

Довжина шляху снаряда – відстань, пройдена в каналі ствола дном снаряда.

Пряма задача внутрішньої балістики – задача, в якій при відомих конструктивних даних і умовах заряджання потрібно

знайти і побудувати криві $P(l)$, $P(t)$, $V(t)$, $V(l)$. Ця задача має єдине рішення.

Зворотна задача внутрішньої балістики – задача, при якій задані d , q , V_0 і потрібно знайти конструктивні характеристики каналу ствола і умови заряджання. Задача має безліч рішень. Як правило, має на меті модернізацію існуючої ствольної системи або створення нової ствольної системи.

2.2. Основні особливості пострілу зі ствольної зброї

В явищі пострілу розрізняють такі періоди:

- 1) попередній – від початку горіння заряду до початку руху снаряда;
- 2) перший або основний – горіння пороху і рух снаряда в каналі ствола (до повного згорання заряду);
- 3) другий – після згорання заряду до вильоту снаряда з каналу ствола;
- 4) третій – період післядії газів на снаряд після вильоту його з каналу ствола.

У внутрішній балістиці прийняті загальні індекси:

v – запальник;

o – форсування;

m – момент досягнення максимального тиску в каналі ствола;

s – момент закінчення горіння першої фази порохового зерна;

k – момент закінчення горіння металюного снаряда;

d – момент досягнення дульного зрізу каналу ствола;

p – післядія.

$t_s \leq t_k \leq t_d$



Рисунок 1 – Схема ствольного заряду звичайного артилерійського знаряддя

В артилерійському знарядді снаряд рухається в каналі під дією сили тиску порохових газів на його дно.

Ствол гармати являє собою трубу, закриту з одного боку нерухомим затвором, з іншого – рухомим снарядом (рис. 1). При пострілі на снаряд діє сила $s P_{cn}$, а на дно каналу – $s P_{дн}$, де s – площа поперечного перерізу каналу разом з нарізами, P_{cn} і $P_{дн}$ – тиск газів на снаряд і дно каналу ствола, причому $P_{дн} > P_{cn}$. Під дією сили тиску $s P_{cn}$ снаряд, рухаючись з прискоренням, вилітає зі ствола з певною початковою (дульною) швидкістю V_0 ; сила тиску $s P_{дн}$, діючи на затвор, повідомляє стовбуру і сполученим із ним частинам лафета рух у зворотний бік – відбувається відкат ствола.

При горінні заряду в каналі ствола тиск P порохових газів і швидкість V снаряда змінюються у функції шляху l снаряда і часу t за цілком певними законами, які можна виразити функціями $P = P(l)$, $V = V(t)$ і $P = P(t)$, $V = V(l)$. Характер цих «кривих тиску і швидкостей» для звичайних стволів «класичної схеми» наведено на рис. 2 і 3.

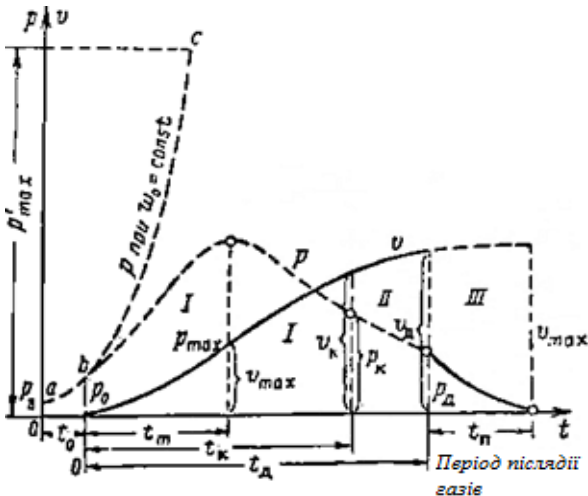


Рисунок 2 – Криві тиску газів і швидкості снаряда в функції часу

Явище пострілу зі ствольної зброї проходить так.

Під дією ударного механізму запалюється запальвальний склад капсульної втулки, яка споряджена димним порохом. При згорянні запального складу в камері утворюються сильно нагріті гази з твердими розжареними частинками продуктів згорання димного пороху. Гази запальника розвивають у камері тиск порядку 20–50 кг/см² і нагрівають порох заряду до температури займання. Цей тиск називається тиском газів запальника (позначається через P_v).

Під дією нагріву і тиску газів запальника порох заряду загоряється і горить у камері спочатку в постійному об'ємі, поки тиск газів не підвищиться до тиску P_0 достатнього для врізання паска снаряда в нарізи каналу ствола. Тиск P_0 називається тиском форсування. Ця частина процесу пострілу називається попереднім періодом.

Величина тиску P_0 може бути порядку 250–500 кг/см² і залежить від пристрою паска і нарізів. На рисунку 2 попередньому періоду горіння пороху відповідає ділянка кривої $P_v - P_0$ і проміжок часу t_0 , а на рисунку 3 – відрізок 0- P_0 на осі ординат.

За попередніми періодом йде перший або основний період пострілу – період горіння пороху в об'ємі каналу, що збільшується. При цьому порохові гази, що повідомляють снаряду всезростаючу швидкість, виконують роботу і охолоджуються.

На початку першого періоду, коли швидкість снаряда ще невелика, об'єм газів, що утворюється зростає швидше, ніж об'єм заснарядного простору, в якому відбувається горіння. У результаті тиск швидко підвищується, досягаючи максимуму P'_{\max} , снаряд до цього моменту проходить шлях l_m , якому відповідає час t_t від початку руху. Тиск P_{\max} є найважливішою характеристикою даного зброя. Надалі, незважаючи на тривалість горіння пороху і приплив нових газів, тиск починає падати, досягаючи величини P_k до моменту повного згорання пороху. Цьому тиску відповідають шлях снаряда l_k , час t_k і

швидкість снаряда V_k . Упродовж першого періоду газів здійснюють більшу частину роботи.

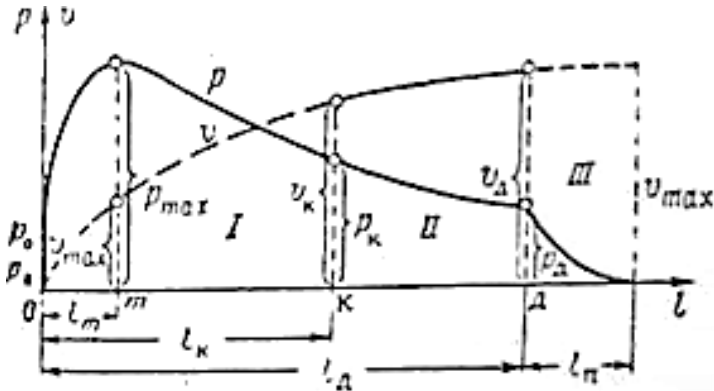


Рисунок 3 – Криві тиску газів і швидкості снаряда в функції шляху снаряда

Після згоряння порошу приплив газів припиняється, але так як наявні в каналі ствола газів мають ще дуже великий запас енергії, то на ділянці шляху, що залишилася до дульного зрізу, вони продовжують розширюватися і здійснювати роботу, збільшуючи швидкість снаряда. Цей період називається другим періодом пострілу і являє собою фізичний процес розширення певної кількості сильно стислих і нагрітих газів. Так як у момент кінця горіння порошу швидкість снаряда вже велика і далі ще збільшується, то ділянку шляху до дульного зрізу снаряд проходить дуже швидко; тому можна знехтувати втратою тепла через стінки стовбура і вважати весь цей період періодом адіабатичного розширення газів. Він закінчується в момент, коли дно снаряда проходить дуловий зріз стовбура. У другому періоді пострілу тиск падає від тиску P_k наприкінці горіння до дульного P_0 , а швидкість снаряда наростає відповідно від V_k до V_0 (див. рис. 2 і 3).

2.3. Конструкція вогнепальної зброї

2.3.1. Стовбур

Основними конструктивними елементами вогнепальної зброї є: стовбур, замикаючий пристрій і пристрій для запалювання. Ствол призначений щоб надати кулі спрямованого руху. Внутрішня порожнина ствола називається каналом ствола.

Торець ствола, найближчий до патронника, називається казенним зрізом, протилежний торець – дульним зрізом.

За устроєм каналу ствола поділяються на:

- 1) гладкостінні;
- 2) нарізні.

Канал ствола нарізної зброї має, як правило, три основних частини: патронник, кульний вхід, нарізну частину (рис. 4).

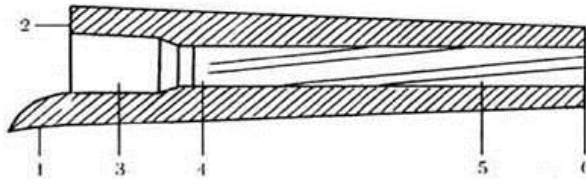


Рисунок 4 – Поздовжній розріз ствола нарізної зброї:

1 – патронне введення; 2 – казенний зріз; 3 – патронник; 4 – кульний вхід; 5 – нарізна частина каналу ствола; 6 – дульний зріз

Патронник призначений для розміщення і фіксації патрона. Його форма і розміри визначаються формою і розмірами гільзи патрона. У більшості випадків форма патронника має три-чотири сполучених конуси: в патронниках підгвинтівковий і проміжний патрон – чотири конуси, під патрон із циліндричною гільзою – один. Для уповільнення виходу стріляної гільзи зі ствола під дією порохових газів у патроннику можуть бути сформовані похилі нарізи.

Патронники магазинної зброї починаються патронним введенням – жолобком, по якому ковзає куля патрона при подачі його з магазину.

Кульовий вхід – ділянка каналу ствола між патронником і нарізною частиною. Кульовий вхід служить для правильної

орієнтації кулі в каналі ствола і має форму усіченого конуса з нарізами, поля яких плавно піднімаються від нуля до висоти. Довжина кульового входу повинна забезпечувати входження провідної частини кулі в нарізи каналу ствола перш, ніж дно кулі залишить дульце гільзи.

Нарізна частина ствола служить для надання кулі не лише поступального, а й обертального руху, що стабілізує її орієнтацію у польоті. Нарізи є полосовидні поглиблення, що в'ються уздовж стінок каналу ствола. Нижня поверхня нарізу називається дном, бічні стінки – гранями. Межа нарізу, яка звернена убік патронника і сприймає основний тиск кулі, називається бойовою або ведучою, протилежна – холостою. Виступаючі ділянки між нарізами – поля нарізів (рис. 5).

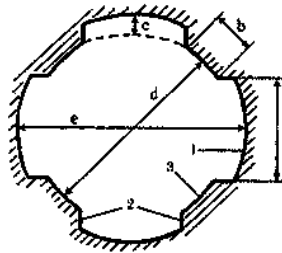


Рисунок 5 – Поперечний розріз ствола нарізної зброї:

1 – дно нарізу; 2 – грані нарізу; 3 – поле нарізу (а – ширина нарізу; b – ширина поля нарізу; c – глибина нарізу; d – діаметр каналу ствола за полями (калібр); e – діаметр каналу ствола за нарізами)

Відстань, у якій нарізи роблять повний оберт, називається кроком нарізів. Для зброї певного калібру крок нарізів однозначно пов'язаний із кутом нахилу нарізів – кутом між гранню і утворюючого каналу ствола.

У сучасній зброї число нарізів, як правило, парне. Зазвичай число нарізів становить 4 або 6. У зброї застарілих зразків буває парна кількість нарізів.

Напрямок нарізів може бути правим (за годинниковою стрілкою) і лівим (проти годинникової стрілки). У більшості моделей зброї нарізи з правим нахилом.

Розміри і форма дна, граней, полів нарізів визначають їх профіль. Розрізняють прямокутні, трапецієподібні і сегментні нарізи (рис. 6). Площини граней одного нарізу при прямокутній нарізці паралельні, при трапецієподібній – перебувають під деяким кутом один до одного. Основне поширення одержала прямокутна нарізка.

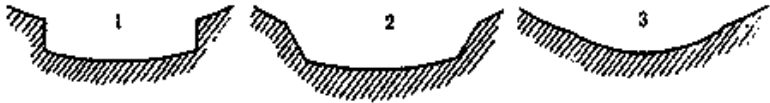


Рисунок 6 – Види профілів нарізів:

1 – прямокутний; 2 – трапецієподібний; 3 – сегментний

Інтерес викликають стволи з особливою нарізкою, так звані полігональні стволи, канал яких являє собою закручену вздовж поздовжньої осі багатокутну призму, а його поперечний переріз відповідно правильний багатокутник. Вважається, що такі стволи забезпечують менше розсіювання і володіють більшою «живучістю», тобто більш довговічні.

2.3.2. Калібр і запірний пристрій

Однією з головних характеристик зброї є його калібр.

Калібром нарізної зброї називається внутрішній діаметр каналу ствола, що вимірюється за полями нарізів. При парній кількості нарізів цей діаметр збігається з відстанню між протилежними полями нарізів.

За іншою системою, прийнятою в ряді європейських країн, калібр вимірюється між протилежними нарізами.

Калібр може визначатися або в міліметрах, або в дюймах. Для переходу значення калібру з однієї системи в іншу потрібно пам'ятати, що 1 дюйм дорівнює 25,4 мм. Крім того, потрібно враховувати, що десята частина дюйма називається лінією, сота – точкою. Таким чином, 1 дюйм = 10 лініям = 100 точкам.

Канал ствола гладкоствольної зброї за конструкцією багато в чому аналогічний розглянутому вище для нарізної. Є патронник для розміщення і фіксації патронів, снарядний вхід (перехідний конус) із плавними, округлими обрисами. Ділянку каналу ствола від снарядного входу до дульного зрізу роблять

або цілком циліндричною, або частіше з дульними пристроями, призначеними для зменшення або збільшення розсіювання дробу.

Калібр гладкоствольної зброї позначають за парним числом круглих (кулястих) куль, що відливаються з одного англійського торгового фунта свинцю (453,6 м) і мають діаметр, рівний діаметру каналу ствола, в 220 мм від його казенного зрізу.

Іншим основним конструктивним елементом вогнепальної зброї є запірний пристрій. Запирання каналу ствола вогнепальної зброї з боку його казенного зрізу – обов'язкова умова виробництва пострілу.

2.3.3. Ударні та спускові механізми

Створення механічних пристроїв для запалювання стало можливим після винаходу запальних складів (що одержали назву ініціюючих), чутливих до механічного впливу – удару.

До теперішнього часу склалися чотири основних конструктивних типу ударних механізмів (рис. 7):

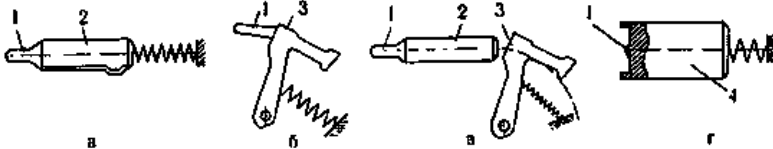


Рисунок 7 – Конструктивні типи ударних механізмів:

а – ударний; б – курковий; в – курково-ударний; г – затворний (1 – бойок; 2 – ударник; 3 – курок; 4 – затвор)

Ударний. Удар по капсулю наноситься ударником, що представляє собою поздовжньо-ковзний стрижень, розміщений у спеціальному каналі всередині затвора. Передня частина ударника називається бойком («Парабелум», ТК).

Курковий. Удар по капсулю наноситься курком, що обертається навколо осі перпендикулярної каналу ствола, на якому жорстко або рухливо закріплений ударник (револьвер Нагана, деякі моделі мисливських рушниць, в основному з внутрішнім курком). Курки можуть бути: поворотні (інерційної

дії), які після удару по капсулю відходять назад і встають на запобіжний взвод, а також безповоротні, що залишаються в крайньому передньому положенні після удару.

Курково-ударний. Курок і ударник роздільно включені в конструкцію зброї. Капсуль розбивається ударником, на який впливає курок. Це найбільш поширена конструкція ударного механізму. Курок може розміщуватися відкрито (ПМ, Вальтер, Беретта) або приховано (Браунінг зразка 1903р., АКМ, СВД та ін.).

Затворний. Бойок виконаний у вигляді виступу на патронному упорі затвора. Капсуль розбивається в момент замикання каналу ствола. Така схема характерна для пістолетів-кулеметів (ППШ, ППС, ПП-90 і т. д.)

Спусковий механізм вогнепальної зброї в загальному випадку забезпечує управління початком і закінченням стрільби.

Спусковий і ударний механізм функціонують у тісній взаємодії, тому ці механізми часто розглядають як єдиний і називають ударно-спусковим механізмом (УСМ).

Спускові механізми, які забезпечують лише спуск попередньо зведеного курка з бойового взводу, одержали назву механізмів одинарної дії.

Спускові механізми, що забезпечують крім цього і взведення курка при натисканні на спусковий гачок (самовзводу), називаються спусковими механізмами подвійної дії. При цьому окремі моделі зброї і часто саморобна зброя допускають лише стрільянину самовзводом.

Основними деталями спускового механізму є: спусковий гачок, спускова тяга, шептало.

2.3.4. Механізм вилучення і видалення гільз

Механізм вилучення і видалення гільз служить для вилучення стріляних гільз чи патрона з патронника і видалення їх зі зброї.

Повне видалення стріляних гільз зі зброї називається – «ежекція». Неповне видалення гільз, а лише витягування їх з патронника – «екстракція». При екстракції стріляна гільза остаточно видаляється вручну.

У зброї з поздовжньо-ковзаючим затвором механізм видалення гільз складається з викидача, розміщеного на затворі, і відбивача, розміщеного на нерухомій частині зброї. Викидач має зачіп (зуб), який заскакує за фланець гільзи при досиланні патрона в патронник і надалі утримує її при русі затвора назад.

Видалення гільзи з гвинтівок відбувається при її ударі під час руху затвора назад об відбивач, у результаті гільза набуває обертальний рух і викидається через гільзовідводне вікно. Напрямок викиду гільзи визначається взаємним розміщенням зачепа викидача й відбивача.

2.3.5. Приціли і запобіжники

Пристосування для наведення зброї на ціль, що називаються прицільними, найчастіше складаються з мушки і цілика або мушки і прицільної планки.

Розділяють постійні приціли, коли мушка і цілик нерухомі, і змінні приціли з рухомим, як правило, ціликом. Нерухомий приціл із ціликом у вигляді планки з прорізом часто називають – простим відкритим.

Переміщення частин прицілу у вертикальній площині служить для введення поправок у кут кидання, при зміні дистанції до цілі.

Запобіжні пристрої призначені для виключення ненавмисного і передчасного пострілу і забезпечення тим самим безпеки при поводженні зі зброєю. Дія запобіжників ґрунтується на жорсткому фіксуванні деталей ударно-спускового механізму або на їх розчепленні.

За способом дії запобіжники діляться на автоматичні, які діють всупереч волі стрілка, і неавтоматичні, спеціально включаються стрільком.

Тема 3. ПОРОХ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

План

- 3.1. Класифікація вибухових речовин.
- 3.2. Фізико-хімічні характеристики порохів.
- 3.3. Балістичні характеристики порохів.
- 3.4. Щільність заряджання. Гравіметрична щільність.

3.5. Характеристики форми.

3.6. Основні фази процесу горіння пороху.

3.1. Класифікація вибухових речовин

За бойовим призначенням усі ВР поділяються на:

- ініціюючі;
- бризантні;
- металеві;
- піротехнічні.

Ініціюючі ВР – вибухові речовини, здатні під впливом початкового імпульсу (удар, тертя, стиснення, іскра, полум'я, нагрів) детонувати і викликати займання, вибух або детонацію інших ВР. Знаходять застосування в спорядженні капсулів патронів, капсульних втулок артилерійських пострілів і детонаторів до мін, снарядів та гранат.

Бризантні ВР – вибухові речовини, основним видом вибухового перетворення яких є детонація. Ці речовини мало чутливі до механічних впливів – тертя, удару, прострілу кулею, однак володіють гарною сприйнятливістю до початкового імпульсу від ініціюючих ВР.

Порохами називається група металевих вибухових речовин, які застосовуються у вогнепальній зброї для повідомлення енергії снаряду руху.

За призначенням (видами зброї) зазвичай порохи поділяються на чотири групи:

- гарматні порохи;
- порохи для стрілецької зброї;
- мінометні порохи;
- ракетні порохи.

Пороху, що застосовуються в артилерії, діляться на дві групи:

- порохи – механічні суміші;
- порохи – колоїдні системи.

Порохи – механічні суміші, з яких найбільш поширеним є селітро-сіровугільний порох, названий димним або чорним порохом, знаходять застосування в запальниках, капсульних

втулках, «дистанційних трубках і як вишибний заряд у шрапнелях. Одержують механічним змішуванням окиснювачів, пальних, зв'язуючих речовин.

Димний, або чорний порох – механічна суміш селітри, вугілля і сірки.

Селітра (KNO_3) включає в себе кисневмісну групу, яка віддає при вибуху кисень, необхідний для горіння сірки і вугілля.

Сірка, що додається до вугілля як пальна речовина, відіграє роль цементуючого складу суміші і зменшує гігроскопічність пороху.

Амонійний порох або селітро-вугільні добавки – порох із механічної суміші аміачної селітри і вугілля, які називаються селітро-вугільними добавками (СУД).

Недолік СУД: мала фізична стійкість (гігроскопічність, зміна структури або злежування).

Для балістичних цілей застосовується порох колоїдного типу, який називається бездимним. Головною основою бездимних порохів є піроксилін (нітрована целюлоза), який обробляється розчинником.

Порохи на летючому розчиннику, як правило, називають піроксиліновими порохами (одноосновними). Застосовуються для гвинтівок і пістолетів.

Порохи на важколеткому і нелеткому розчинниках одержали назву баліститів (двоосновний). Використовуються для мінометів, снарядів і ракет.

Порохи на змішаному розчиннику називаються кордитами (для гармат і мінометів).

Порохи емульсійного приготування (лакові) використовуються лише для стрілецької зброї.

3.2. Фізико-хімічні характеристики порохів

Нітроцелюлозний порох роговидна речовина з більшим або меншим ступенем прозорості. Колір порохів дуже різноманітний і залежить від складу і особливостей виробництва. Може бути світло-жовтим, темно-жовтим, сіро-зеленим, коричневим, чорним. Ступінь прозорості залежить від

складу і, в деякій мірі, від технологій виготовлення. Поверхня порошу може бути шорсткою, матовою або полірованою. Дрібні порохи для ручної зброї здебільшого графітують, тому поверхня їх має блискучий чорний колір, нагадуючи за виглядом димний рушничний порох.

Щільність більшості нітроцелюлозних порохів коливається від 1,54 до 1,64 г/см³. Вона залежить від складу і умов технологічного виготовлення.

Горіння порошу супроводжується виділенням тепла і газоподібних продуктів. Склад порохових газів визначається, головним чином, 6 компонентами: CO, H₂, N₂, O₂, CO₂, H₂O (пар). Іноді підмішуються в процесі горіння CH₄, NO, NH₃.

Тепловий ефект горіння або кількість тепла Q, що виділяється при згоранні 1 кг порошу, є найважливішою характеристикою порохів як джерела енергії. Звичайно, за умовами горіння розрізняють теплоту горіння при постійному об'ємі Q_w і при постійному тиску Q_p. Зв'язок між ними порівняно простий:

$$Q_w = Q_p + \mu RT .$$

де μ – кількість граммолей газоподібних продуктів на 1 кг порошу;

R – універсальна газова постійна;

T – температура горіння в °K.

Теплота горіння порошу може розраховуватися теоретично при відомих складі порошу і умовах горіння на основі певних положень термохімії. Також порівняно просто тепловий ефект горіння можна визначити за допомогою спеціальних калориметричних установок.

Об'єм газів при тиску 760 мм і температурі 0 °C, що утворилися при вибуху 1 кг порошу (W, дм³/кг), має істотне значення при визначенні величин тиску в каналі ствола зброї при пострілі.

Для піроксилінових порохів W = 900–970 дм³/кг, для нітрогліцерінових дещо менше 800–860 дм³/кг.

За відомими з досвіду складу продуктів горіння і тепловому ефекті розраховується температура горіння при

постійному об'ємі T_1 °К або при постійному тиску T_0 °К. Температура горіння T_1 нітроцелюлозних порохів змінюється в межах 2400–3800 °К; T_0 1900–3000.

3.3. Балістичні характеристики порохів

Крім фізико-хімічних характеристик порохів, у внутрішній балістиці використовуються спеціальні балістичні характеристики порохів: сила пороху, питома коволюм порохових газів і коефіцієнт швидкості горіння.

Балістичними характеристиками пороху називаються постійні величини, що впливають на характер піродинамічного процесу. Балістичні характеристики залежать від фізико-хімічних властивостей пороху.

Сила пороху – робота, яку б здійснювали газоподібні продукти горіння 1 кг пороху, розширюючись під атмосферним тиском при нагріванні від 0 до температури горіння T_1 °К.

Сила пороху обчислюється за виразом:

$$f = RT_1 = P_a w_1 / 273,$$

де $P_a = 1,033$ кг/см² – атмосферний тиск;

w_1 – об'єм газоподібних продуктів горіння 1 кг пороху, кг/дм³;

T_1 – температура горіння при постійному об'ємі, °К.

Сила нітроцелюлозних порохів змінюється від 800000 до 1250000 кг·дм/кг. Сила пороху впливає на величину тиску порохових газів. Із збільшенням f тиск газів при інших рівних умовах зростає.

Коволюм – об'єм, пропорційний об'єму молекул газу, що утворилися при згорянні 1 кг пороху, дм³/кг.

Питомий коволюм є межею, до якого прагне питомий об'єм газу при нескінченно великому тиску. Питомий коволюм можна подати як суму об'ємів сфер дії окремих молекул 1 кг газів.

Питомий коволюм газів впливає на величину тиску порохових газів, який при інших рівних умовах зростає із збільшенням коволюма.

Швидкість горіння пороху u_1 при тиску $p = 1$ залежить від хімічного складу пороху, а також від вмісту летких компонентів (дм/с/кг/дм²).

Балістичні характеристики, що залежать від природи пороху, визначаються дослідним шляхом при спалюванні в манометричній бомбі.

3.4. Щільність заряджання. Гравіметрична щільність

Крім балістичних характеристик пороху на величину наростання тиску впливає щільність заряджання Δ , г/дм³. Щільність заряджання – відношення ваги заряду ω до об'єму W_0 , в якому відбувається горіння.

$$\Delta = \frac{\omega}{W_0}.$$

Якщо заповнити весь об'єм W_0 порохом, то щільність заряджання перетвориться в гравіметричну щільність $\Delta_{гр}$. Вона характеризує ступінь компактності заряду.

3.5. Характеристики форми

Форма і розміри порохів є головними факторами, які визначають закон газоутворення при горінні пороху. Вони визначають питому поверхню горіння, під якою розуміють відношення початкової поверхні порохового зерна до його об'єму. Від цих факторів залежить можливість використання того чи іншого пороху в знарядді. При цьому визначальним розміром є найменша товщина палаючого шару. Так як горіння зерна йде з двох сторін, то найменшу товщину палаючого шару визначають $2e_1$.

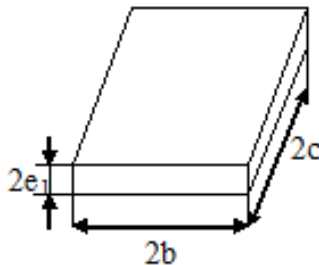


Рисунок 8 – Геометричні розміри порохових елементів

$$\alpha = \frac{2e_1}{2b};$$

$$\beta = \frac{2e_1}{2c}.$$

Із даних виразів складаються первинні характеристики порохового зерна

$$\begin{aligned}\kappa'_1 &= 1 + \alpha + \beta; \\ \lambda'_1 &= - \frac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{\kappa'_1}; \\ \mu'_1 &= \frac{\alpha\beta}{\kappa'_1}.\end{aligned}$$

3.6. Основні фази процесу горіння пороху

У процесі горіння пороху розрізняють три фази – запалювання, займання і горіння.

Запалювання – процес початку горіння пороху під впливом зовнішнього імпульсу (швидкий нагрів, удар). Після того як порох спалахне хоча б в одній точці, реакція горіння йде сама собою за рахунок тепла, яке виділяється при цьому. При запалюванні порох повинен нагріватися швидко, оскільки при повільному нагріванні порох починає розкладатися і втрачати балістичні якості. Після запалювання пороху одночасно йдуть два процеси – запалення і власне горіння.

Займання – процес поширення реакції горіння за всією поверхнею порохових зерен. Швидкість займання залежить, головним чином, від тиску газів, від стану поверхні пороху, від його природи і форми, а також від складу газів і продуктів горіння запальника. Швидкість поширення реакції горіння за поверхнею зерна називається швидкістю займання. Процес запалювання і займання основного заряду залежить не лише від маси заряду запальника і величини створюваного їм тиску, але і від природи пороху запальника.

Горіння пороху – процес поширення реакції горіння вглиб порохового зерна перпендикулярно до його поверхні. Швидкість горіння пороху, в основному залежить від тиску

газів, що оточують порох, від природи пороху і від його температури, а також від швидкості течії газів уздовж поверхні пороху. Швидкість поширення реакції горіння вглиб порохової маси за нормаллю до поверхні зерна називається швидкістю горіння.

Швидкість займання набагато більше швидкості горіння, особливо у димних порохів.

Тема 4. ЗАКОНИ ГОРІННЯ ПОРОХУ Й УТВОРЕННЯ ГАЗІВ

План

- 4.1. Закони горіння пороху.
- 4.2. Закон швидкості горіння пороху.
- 4.3. Швидкість газоутворення.
- 4.4. Зв'язок між геометрією пороху і утворенням газів.
- 4.5. Двучленні залежності для порохів дегресивної форми.
- 4.6. Особливості горіння порохів прогресивної форми.
 - 4.6.1. Порох з сімома каналами.
 - 4.6.2. Зерно Уолша.
 - 4.6.3. Зерно Кіснемського.
- 4.7. Визначення характеристик порохів прогресивної форми.
- 4.8. Фізичний закон горіння пороху.
- 4.9. Застосування дослідної характеристики G_{on} для аналізу горіння порохів.
 - 4.9.1. Аналіз горіння порохів з простою формою зерна.
 - 4.9.2. Аналіз горіння прогресивних порохів.

4.1. Закони горіння пороху

Результати своїх експериментальних досліджень В'ель поклав в основу закону горіння бездимних порохів у замкнутому об'ємі, який полягає в такому:

маса пороху однорідна як за хімічною природою, так і за фізичними властивостями, а геометричні розміри і форма всіх зерен однакові;

поверхня всіх порохових зерен запалюється миттєво і одночасно;

горіння бездимних порохів йде паралельними шарами з однаковою лінійною швидкістю у всіх напрямках вглиб зерна перпендикулярно до палаючих площин.

Положення про миттєвість, а, отже, одночасність займання всіх зерен заряду і одноманітність горіння зерен дає можливість розглядати горіння окремого зерна і зв'язати об'єм порохового зерна, який згорів, з кількістю газів, що утворилися на підставі геометричних міркувань. Саме тому закон одержав назву геометричного.

Геометричний закон горіння лише в першому наближенні відображає дійсні фізичні закономірності горіння порохів.

Насправді є цілий ряд відхилень від припущень, що лежать в основі геометричного закону горіння (неоднорідність порохової маси, неоднаковість розмірів і форми зерен, різні умови займання і горіння окремих зерен). Незважаючи на це, геометричний закон горіння пороху широко застосовується у внутрішній балістиці для одержання різних залежностей, пов'язаних з утворенням газів, і забезпечує досить точні дані, що узгоджуються з практичними результатами.

Виявлення причин відхилень за допомогою нових методів досліджень привело до розробки так званого «фізичного закону горіння» пороху, що враховує значну частину факторів, що впливають на горіння пороху.

Фізичний закон запропонував Серебряков на початку ХХ сторіччя. Цей закон виправдовується практично у разі застосування вузькоканальних довгих, а також дрібних порохів, сюди відносяться і флегматизовані пороху [1].

Сутність цього закону полягає в тому, що основні закономірності процесу горіння встановлюються на підставі аналізу кривих тиску, що є інтегральними характеристиками процесу горіння заряду в цілому. Фізичний закон горіння є більш складним, ніж геометричний.

4.2. Закон швидкості горіння пороху

Швидкість горіння пороху – швидкість переміщення фронту палаючої поверхні за нормаллю вглиб порохового

елемента. Вона вимірюється зміною товщини порошу e в одиницю часу t .

$$u = \frac{de}{dt}.$$

Залежить від природи порошу, його температури і тиску газів, що оточують порох.

Законом швидкості горіння зазвичай називають функціональну залежність швидкості горіння u від тиску p . Визначається безпосередньо обробкою кривої тиску $p = f(t)$, одержаної з досліду при спалюванні порошу в манометричній бомбі. Існує ряд емпіричних залежностей для вираження швидкості горіння [1 – 3].

Перша залежність була дана В'єлем у вигляді

$$u = Ap^{\nu},$$

де A – коефіцієнт і ν – показник ступеня, що залежать від природи порошу та умов проведення досвіду.

У морській науково-технічній лабораторії проф. С. П. Вуколов дав залежність

$$u = ap + b.$$

Цю ж залежність приймав проф. І. П. Граве. Значно пізніше її застосував Мюраур. Обидві формули для бездимного порошу можуть вважатися однаково придатними для вираження того закону, за яким змінюється швидкість горіння при зміні тиску, тому середні помилки за цими формулами виходять однаковими.

Вирази для $u = f(p)$ були одержані обробкою кривих тиску $p = f(t)$, записаних у бомбі за допомогою циліндрових крешерних стовпчиків, які фіксують тиск лише з 300–400 кг/см². Ділянка кривої від початку до $p = 300-400$ кг/см², що могла дати можливість оцінити, яка з двох формул правильніше, тоді не могла бути одержана. У результаті через експериментально одержані точки кривої $u = f(p)$ від $p = 400$ кг/см² і вище можна було з однаковим наближенням провести і параболу $u = Ap^{\nu}$, і пряму $u = ap + b$.

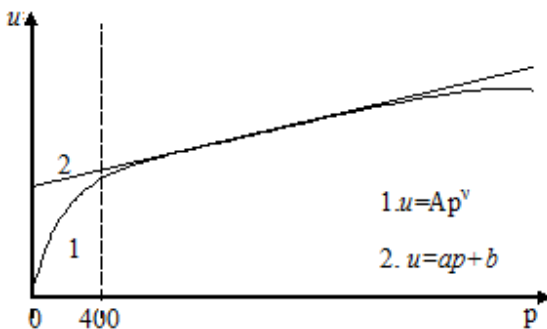


Рисунок 9 – Залежність швидкості горіння порохів від тиску

Пізніше німецький учений Шміц, спалюючи в манометричній бомбі об'ємом 3,5 л трубчасті пороху в натуральну довжину і застосувавши для запису кривої тиску новий манометр з оптичною реєстрацією пружних деформацій починаючи з малих тисків, довів справедливність закону $u = Ap^v$ [1, 3, 4].

Так як $u = \frac{de}{dt} = A_1 p$, то $de = A_1 p dt$. Інтегруючи від початку горіння, маємо $e = A_1 \int_0^t p dt = A_1 I$, де $I = \int_0^t p dt$.

Для кінця горіння $e = t_1$ і $t = t_k$: $e_1 = A_1 \int_0^{t_k} p dt = A_1 I_k$.

І для даного пороху $I_k = \int_0^{t_k} p dt = \frac{e_1}{A_1} = const$.

Інакше кажучи, повний імпульс тиску за весь час горіння пороху залежить лише від товщини пороху, коефіцієнта A_1 , що характеризує природу пороху, і не залежить від щільності заряджання.

Тим часом сама крива $p = f(t)$ різко змінюється зі зміною щільності заряджання Δ : при збільшенні Δ крива тиску підвищується, а час t_k убуває.

Провівши досліди в бомбі зі спалювання одного і того трубчастого пороху при щільності заряджання $\Delta = 0,12-0,26$ і

вимірявши площі одержаних кривих $\int_0^{t_k} p dt$, Шміц зробив висновок, що, дійсно ці площі рівні між собою, а отже, справедливий закон швидкості горіння $u = Ap^v$.

Залежність чи незалежність повного імпульсу тиску $I_k = \int_0^{t_k} p dt$ від щільності заряджання є критерієм справедливості того чи іншого закону швидкості горіння.

Пізніші досліді зі стрічковими і трубчастими порохами показали, що однією якою-небудь залежністю не можна виразити закон швидкості горіння на всьому діапазоні зміни тиску від 20–50 до 3000–6000 кг/см².

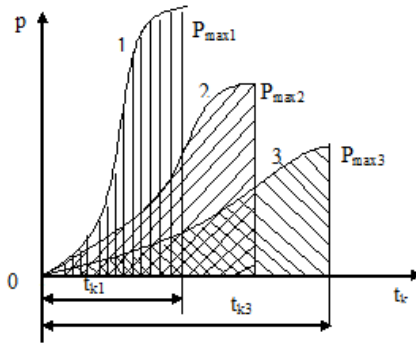


Рисунок 10 – Залежність тиску від часу при різних щільностях заряджання

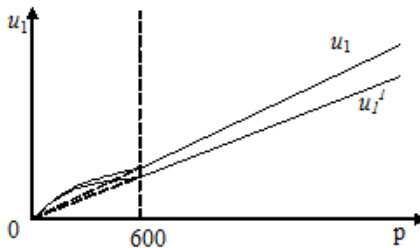


Рисунок 11 – Залежність швидкості горіння для піроксилінових порохів (u – змінна швидкість):

u_1 – тонкий порох;

u_1' – товстий порох.

Для піроксилінових порохів весь діапазон тисків від 50 до 6000 кг/см² можна розділити на дві ділянки: для тисків від 50 до 600 кг/см² і від 600 до 6000 кг/см². На ділянці від 600 до 6000 кг/см² залежність швидкості горіння має вигляд прямої лінії, що проходить через початок координат.

4.3. Швидкість газотворення

Для управління процесом пострілу необхідно вміти регулювати приплив порохових газів при горінні заряду.

Інтенсивність їх утворення залежить не лише від закону швидкості горіння, але і від форми і розмірів порохових елементів.

Якщо допустити, що елементи заряду горять паралельними шарами і обгорають за всією поверхнею на одну і ту саму глибину, то закон утворення газів може бути одержаний на підставі чисто геометричних міркувань. Тоді, якщо позначити через ω – вага заряду, а ψ – відносна частина згорілого заряду, то поточна кількість згорілого пороху, що перетворилася до даного моменту в газу, буде $\omega\psi$, кг. Під час горіння ψ змінюється від 0 до 1. Величину ψ можна представити або як відношення ваги ω' згорілого пороху до початкової ваги ω , або як відношення обсягу згорілого пороху Λ' до його початкового значення Λ_1 . Так як щільність пороху δ береться постійною, то

$$\psi = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{\Lambda'}{\Lambda_1}.$$

Швидкістю газотворення або об'ємною швидкістю горіння називають величину $\frac{d\psi}{d\tau}$, що являє собою відносну частину обсягу або ваги пороху, що згорів та перетворився в газу в одиницю часу.

В основу висновку покладений геометричний закон горіння. Нехай порохове зерно має форму паралелепіпеда. Розглянемо його об'єм і поверхню на початку горіння (Λ_1 і s_1) і в поточний момент (Λ і s), коли зі всіх сторін згорить одна і та сама товщина пороху e .

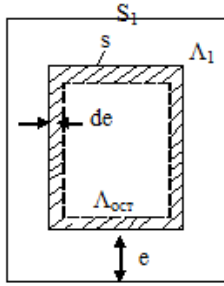


Рисунок 12 – Схема горіння порошу паралельними шарами

За проміжок часу $d\tau$ вся поточна поверхня порошу s переміститься всередину зерна на товщину de ; об'єм згорілого шару $d\Lambda = sde$. Розділивши обидві частини на Λ_1 і $d\tau$,

$$\text{одержимо } \frac{d\frac{\Lambda}{\Lambda_1}}{dt} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{s}{\Lambda_1} \frac{de}{dt} = \frac{su}{\Lambda_1};$$

$$\omega \frac{d\psi}{dt} = \frac{\omega}{\Lambda_1} su = \delta su.$$

Першу формулу можна подати у вигляді

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} u = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} u_1 p,$$

де u_1 залежить від природи порошу, p характеризує фізичний стан середовища, в якому відбувається горіння порошу, перші два множника залежать від геометрії порохових зерен і характеризують вплив форми і розмірів порошу на швидкість газоутворення:

$\frac{s_1}{\Lambda_1}$ – початкова питома поверхня порошу або його

початкова «оголеність»;

$\frac{s}{s_1}$ – відносна поверхня порошу, що характеризує зміну

поверхні порошу під час горіння.

Із розгляду швидкості газоутворення можна зробити найважливіші висновки про можливі способи управління утворенням порохових газів:

- шляхом вибору відповідних геометричних даних (розмірів і форми) порохового зерна;
- застосуванням пороху з певним коефіцієнтом швидкості горіння u_1 , що залежить від складу порохової маси.

З останньої формули одержимо $\frac{1}{p} \frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} u_1 = \frac{su_1}{\Lambda_1}$.

Добуток su_1 виражає об'єм газів, що утворюється в одиницю часу при $p = 1$. Величину $\frac{su_1}{\Lambda_1}$ можна назвати питомою інтенсивністю газоутворення, віднесеної до тиску $p = 1$; її позначають через Γ :

$$\Gamma = \frac{1}{p} \frac{d\psi}{dt} = \frac{su_1}{\Lambda_1} \delta.$$

Величина $\Gamma_1 = \frac{su_1}{\Lambda_1}$ характеризує початкову інтенсивність газоутворення при $p = 1$. Її іноді називають «жвавистю» або «гостротою» пороху.

4.4. Зв'язок між геометрією пороху і утворенням газів

При поросі певної природи регулювати приплив газів в одиницю часу можна або за рахунок щільності заряджання, або за рахунок розмірів і форми порохових зерен.

Щоб з'ясувати вплив геометричних даних зерна на швидкість газоутворення залежно від згорілої частини товщини до даного моменту, можна скористатися основними положеннями геометричного закону горіння.

(Порох дегресивної форми):

e_1 – половина всієї товщини пороху;

e – товщина пороху, що згорів до даного моменту в одному напрямку;

$z = \frac{e}{e_1}$ – відносна товщина порошу, що згорів;

$\psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_1}$ – відносна частина порошу, що згорів (об'ємна);

$\sigma = \frac{s}{s_1}$ – відносна поверхня порошу.

Під час горіння ψ і z змінюються від 0 до 1; σ змінюється від 1 на початку горіння до σ_k наприкінці горіння, причому залежно від форми порошу σ_k може змінюватися в широких межах.

Дослідження показують, що для всіх форм порохів залежність ψ від z виражається формулою одного і того самого виду:

$$\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2),$$

де κ , λ , μ – характеристики форми порошу – постійні числа, які залежать від форми зерна.

Визначивши об'єм згорілої частини Λ_{cz} , об'єм незгорілого порошу Λ_{ocm} , будемо мати

$$\psi = \frac{\Lambda_{cz}}{\Lambda_1} = \frac{\Lambda_1 - \Lambda_{ocm}}{\Lambda_1} = 1 - \frac{\Lambda_{ocm}}{\Lambda_1}.$$

Замінімо величини Λ_1 і Λ_{ocm} їх виразами

$$\Lambda_1 = 2e_1 \cdot 2b \cdot 2c;$$

$$\Lambda_{ocm} = 2(e_1 - e) \cdot 2(b - e) \cdot 2(c - e),$$

де $2e_1$, $2b$, $2c$ – відповідно товщина, ширина і довжина стрічки. Введемо характеристики розтягнутості стрічки.

Відносне зменшення ширини за час горіння

$$\frac{2e_1}{2b} = \frac{e_1}{b} = \alpha < 1.$$

Відносне зменшення довжини за час горіння

$$\frac{2e_1}{2c} = \frac{e_1}{c} = \beta < 1.$$

Тоді відносний об'єм порошу, що залишився

$$\begin{aligned} \frac{\Lambda_{ocm}}{\Lambda_1} &= \frac{(e_1 - e)}{e_1} \frac{(b - e)}{b} \frac{(c - e)}{c} = \left(1 - \frac{e}{e_1}\right) \left(1 - \frac{e}{b}\right) \left(1 - \frac{e}{c}\right) = \\ &= \left(1 - \frac{e}{e_1}\right) \left(1 - \frac{e_1}{b} \frac{e}{e_1}\right) \left(1 - \frac{e_1}{c} \frac{e}{e_1}\right) = (1 - z)(1 - \alpha z)(1 - \beta z) = \\ &= 1 - (1 + \alpha + \beta)z + (\alpha + \beta + \alpha\beta)z^2 - \alpha\beta z^2. \end{aligned}$$

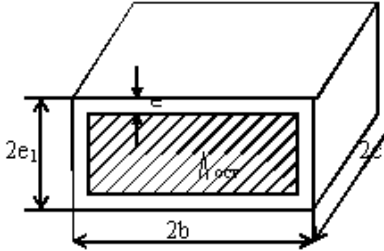


Рисунок 13 – Схема горіння порохової стрічки

Підставляючи цей вираз у формулу $\psi = 1 - \frac{\Lambda_{ocm}}{\Lambda_1}$, а також

вводячи позначення

$$\begin{aligned} 1 + \alpha + \beta &= \kappa; \\ - \frac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{1 + \alpha + \beta} &= \lambda; \\ \frac{\alpha\beta}{1 + \alpha + \beta} &= \mu, \end{aligned}$$

одержимо шукану залежність у вигляді $\psi = f(z)$ у вигляді $\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2)$.

Наприкінці горіння при $\psi_k = 1$ і $z_k = 1$ остання формула обертається в рівність $1 = \kappa(1 + \lambda + \mu)$.

Характеристики κ , λ , μ залежать від співвідношення розмірів: чим коротша і вужча стрічка, тим більші α і β ; чим більше розтягнута стрічка, тим κ ближче до одиниці, а λ , μ до нуля.

Залежність для відносної поверхні $\sigma = \frac{S}{S_1}$ у функції z .

Залежність відносної поверхні σ від відносної товщини z згорілого шару, тобто $\sigma = f(z)$, називається законом зміни поверхні горіння.

Формула $\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2)$ є загальною формулою для всіх форм пороху; різниця буде лише в числових значеннях характеристик κ , λ , μ . Взявши її за основу, виведемо формулу для відносної поверхні пороху.

Диференціюючи рівність $\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2)$ за z , знайдемо: $\frac{d\psi}{dz} = \kappa(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2)$. Подаємо ліву частину у

вигляді $\frac{d\psi}{dz} = \frac{d\psi}{dt} \frac{dt}{de} \frac{de}{dz}$, але $\frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} \frac{de}{dt}$; $z = \frac{e}{e_1}$;

$\frac{de}{dz} = e_1$. Тоді $\frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} e_1 = \kappa(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2)$. Для початку горіння

при $z = 0$ і $\frac{s}{s_1} = 1$ одержуємо $\frac{s_1}{\Lambda_1} e_1 = \kappa$. Розділивши почленно

вираз $\frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} e_1 = \kappa(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2)$ на $\frac{s_1}{\Lambda_1} e_1 = \kappa$, одержимо

залежність $\sigma = \frac{s}{s_1} = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2$.

На початку горіння при $z = 0$ $\sigma_0 = 1$. Наприкінці горіння при $z = 1$ $\sigma_k = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2$. При горінні пороху, коли z змінюється від 0 до 1, зміна σ буде залежати головним чином від величини і знака характеристики λ , так як μ мало порівняно з λ .

Якщо поверхня пороху при горінні убуває (стрічковий порох, куб, брусок) $\lambda < 0$), то така форма пороху називається дегресивною; якщо ж поверхня при горінні зростає (порох із багатьма каналами, $\lambda > 0$), то така форма пороху називається прогресивною. Зростання поверхні горіння є бажаним при використанні пороху в знарядді, так як збільшення поверхні горіння забезпечує збільшення швидкості газотворення в

процесі горіння і менш різке падіння тиску газів по шляху снаряда. Цим визначається значення порохів прогресивної форми.

Наочне уявлення про зміну поверхні горіння дає графічне зображення закону зміни поверхні горіння, подане на рисунку. За віссю абсцис відкладені значення z від 0 до 1, за віссю ординат – значення σ . Криві відповідають таким формам: 1 – трубки, 2 – стрічці, 3 – квадратній пластинці, 4 – циліндричному прутку і квадратному бруску, 5 – кубу і кулі. Усі криві починаються від точки $(0,1)$, що відповідає початку горіння, коли $\sigma = 1$.

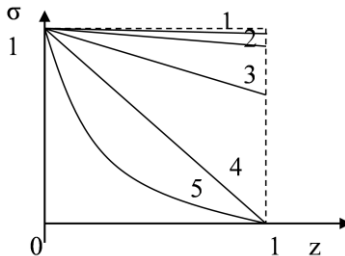


Рисунок 14 – Зміна поверхні при горінні дегресивних порохів

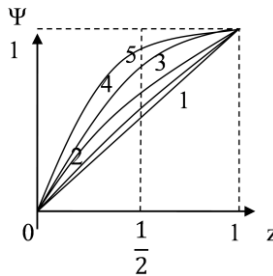


Рисунок 15 – Вплив форми зерна на приплив газів для регресивних порохів

Графіки σ , z і ψ , z називаються листами прогресивності.

Поверхня горіння трубки в процесі горіння зменшується незначно, так як при зменшенні її зовнішньої поверхні одночасно збільшується поверхня каналу, частково компенсуючи зменшення зовнішньої поверхні.

Трубчаста форма при досить великій відносній довжині має малу дегресивність і близько підходить до пороху з

постійною поверхнею горіння. Дещо більшою дегресивністю володіє стрічка. Крива 2 побудована для тієї самої відносної товщини, що і пряма 1 для трубки. Так як для досить довгої стрічки значення c з досить незначне, то крива 2 близька до прямої.

Найбільша дегресивність властива квадратному бруску, циліндричному прутку (крива 4) і особливо кубу та кулі (крива 5). У останніх двох форм поверхня горіння зменшується вкрай різко, тому ці форми не представляють практичної цінності для артилерійських знарядь.

При $z=0$, $\psi=0$, $\sigma=1$; при $z=1$, $\psi=1$ усі криві знаходяться всередині квадрата зі стороною, що дорівнює одиниці, всі криві починаються в початку координат і проходять через точку $\psi=1$, $z=1$; тангенс кута нахилу на початку

$\left(\frac{d\psi}{dz}\right)_0 = x$, подальша зміна кута нахилу характеризується

величиною σ ; так як σ у всіх розглянутих форм порохів зменшується, то зменшується і кут нахилу у всіх кривих, і, отже, всі криві звернені опуклістю догори. У трубки x близька до 1, і σ змінюється мало, крива 1 майже зливається з діагоналлю, проведеною з початку координат; у куба $x=3$, найбільша крива 5 має найбільший кут нахилу на початку і найбільша зміна цього кута відповідна до зміни σ ; у куба і у бруска $\sigma_k=0$, отже, криві стосуються горизонталі 1 — 1 при $z=1$.

Діаграма показує, що при даному значенні z згорить тим більша частина ψ зерна, чим дегресивніше порох. Більш дегресивний порох дає більшу кількість газів у першій половині процесу горіння і меншу у другій.

4.5. Двучленні залежності для порохів дегресивної форми

Одержані тричленні залежності для $\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2)$ і $\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2$. Для спрощення наведених залежностей, що застосовуються для вирішення задач внутрішньої балістики, використовують двучленні залежності, які одержують за

рахунок відкидання останнього члена μz^2 . Вплив цього члена компенсують невеликою зміною характеристик κ і λ , але так, щоб крива ψ , z із двучленною залежності як можна ближче апроксимувала криву ψ , z при тричленній залежності.

При заміні тричленною формули більш простою двучленною необхідно змінити характеристики κ і λ : $\psi = \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z)$.

При $z = 0$ в обох виразах $\psi = 0$.

При $z = 1$, $\kappa(1 + \lambda + \mu) = \kappa_1(1 + \lambda_1) = 1$.

При $z = 0,5$, $\frac{\kappa}{2}(1 + \frac{\lambda}{2} + \frac{\mu}{4}) = \frac{\kappa_1}{2}(1 + \frac{\lambda_1}{2})$.

Вирішуючи цю систему, одержуємо:

$$\kappa_1 = \kappa(1 - \frac{\mu}{2})$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\kappa_1} - 1.$$

При двучленній залежності:

$$\psi = \kappa_1 z(1 + \lambda_1 z),$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1 z.$$

Виключаючи з цих формул z , знайдемо безпосередню залежність σ від ψ :

$$\sigma = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi}.$$

4.6. Особливості горіння порохів прогресивної форми

Порохами прогресивної форми називаються такі порохи, у яких поверхня по мірі згорання зростає. До таких порохів відносяться багатоканальні порохи – циліндричне зерно з 7 каналами, зерно Уолша, зерно Кіснемського [1–3].

4.6.1. Порох з сімома каналами

У зерні один канал – центральний – розміщений за віссю зерна і компенсує спадання зовнішньої поверхні, а шість розміщені за колом у вершинах правильного шестикутника,

дають при горінні прирощення поверхні. Внаслідок цього товщина зводу між центральним каналом і кожним із зовнішніх каналів за радіусами і між зовнішніми каналами за сторонами шестикутника однакова, що забезпечує одночасність згоряння всіх товщин зводів.

Зовнішня поверхня також розміщена на відстані товщини зводу від зовнішніх каналів.

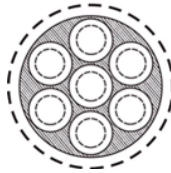


Рисунок 16 – Порох з сімома каналами

Практикою встановлено такі співвідношення розмірів: діаметр каналу

$d_0 = e_1$ (половина товщини зводу); діаметр зерна $D_0 = 3d_0 + 4 \cdot 2e_1 = 11d_0 = 11e_1$; довжина зерна – 2–2,5 зовнішнього діаметра зерна; $2c = (2 - 2,5) D_0$.

Горіння всередині каналів йде за концентричними циліндричними поверхнями. Коли у всіх напрямках і зсередини каналів і з зовнішньої поверхні згорить товщина e_1 , усі циліндричні поверхні зустрінуться і відбудеться розпад зерна на 12 прутків або призм криволінійного перерізу: 6 внутрішніх малих і 6 зовнішніх великих. Ці продукти розпаду горять із різким убаванням поверхні.

Основними характеристиками порохів, які горять з розпадом, є відносна поверхня в момент розпаду σ_s , згоріла частина заряду ψ_s і товщина елементів розпаду p (індекс s вказує на момент розпаду).

На відміну від порохів дегресивної форми горіння при $z_s = 1$ настає розпад зерна, а кінець горіння всього пороху відповідає кінцю горіння елементів розпаду, коли $e_k = e_1 + p$ і $z_s > 1$.

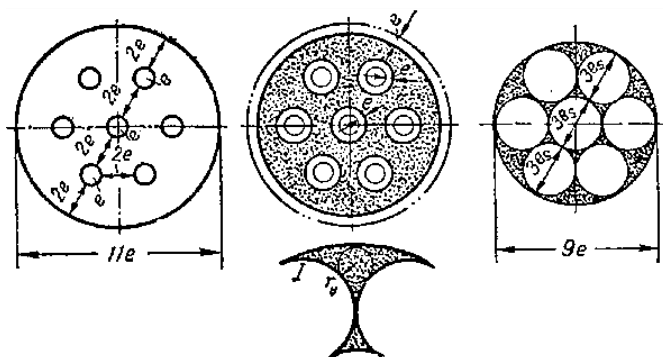


Рисунок 17 – Співвідношення розмірів пороха з сімома каналами

Характеристики зерна з сімома каналами при стандартних співвідношеннях розмірів: зростання поверхні до моменту розпаду 37 %; $\sigma_s = \frac{s_s}{s_1} = 1,37$, де s_s – палаюча поверхня зерна в момент розпаду; згоріла частина зерна до того самого моменту $\psi_s \approx 0,85$; решта 15 % горять дегресивно. У момент повного згоряння зерна $e_k = e_1 + p = e_1 + 0,532 e_1$; $z_k = 1,532$; $\psi_k = 1$; $\sigma_k = 0$.

4.6.2. Зерно Уолша

Розпад є істотним недоліком циліндричного зерна з сімома каналами.

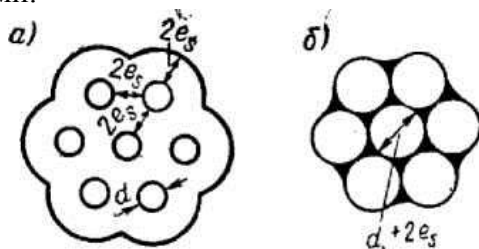


Рисунок 18 – Зерно Уолша

З метою зменшення маси пороха, яка горить після розпаду, зовнішній поверхні було надано (Уолш) фігурний

обрис (рис. 18 а). Завдяки цьому зменшуються розміри шести зовнішніх елементів, що випадають при розпаді звичайного циліндричного зерна з сімома каналами. У момент розпаду зерно набире вигляду, показаного на рис. 18 б.

Для цієї форми $\psi_s = 0,95$, тобто близько 95 % маси зерна згоряє до розпаду. Збільшення поверхні становить приблизно 27 % ($\psi_s = 1,27$).

4.6.3. Зерно Кіснемського

Зерно з великим збільшенням поверхні горіння (до 2 і більше разів) було запропоновано Кіснемським (рис. 19).

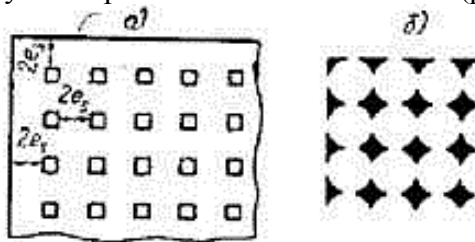


Рисунок 19 – Зерно Кіснемського

Зерно Кіснемського являє собою призму з великим числом каналів квадратного перетину. За рахунок збільшення поверхні каналів поверхня горіння повинна значно збільшуватися.

Ця форма також не вільна від розпаду, так як квадратні канали в процесі горіння заокруглюються, в результаті чого утворюється велика кількість елементів розпаду, показаних на рис. 18б. Причина заокруглення кутів: горіння з кутів за діагоналями відбувається з тією самою швидкістю, що і за перпендикулярами до сторін каналів. Зі збільшенням поверхні згоряє близько 90 % маси зерна.

За припущеннями Кіснемського квадратний канал при горінні паралельними шарами повинен був горіти, залишаючись квадратним, і тоді горіння мало б скінчитися без розпаду. Крім того, велика кількість вузьких каналів повинна була забезпечити високу прогресивність зерна. Але дане порохове зерно не знайшло практичного застосування, оскільки призми так і залишились.

4.7. Визначення характеристик порохів прогресивної форми

Закон горіння і закон вимірювання поверхні для порохів прогресивної форми виражаються тими самими загальними формулами:

$$\psi = \kappa z(1 + \lambda z + \mu z^2),$$

як і для дегресивних форм; різниця лише в числових значеннях характеристик форми κ , λ , μ . Вивід рівнянь для характеристик форми проводиться за тим самим методом, що і для дегресивних порохів, лише вирази виходять більш складними, ніж для дегресивних порохів.

Характеристика розтягнутості за довжиною $\beta = \frac{2e_1}{2c} = \frac{e_1}{c}$

залишається та сама, замість характеристики $\alpha = \frac{e_1}{b}$ взято дві характеристики:

Π_1 – відношення периметра перетину бруска до периметру кола, побудованого на довжині $2c$, як на діаметрі:

$$\Pi_1 = \frac{\pi(D_0 + nd_0)}{\pi 2c} = \frac{D_0 + nd_0}{2c};$$

Q_1 – відношення площі поперечного перерізу зерна з каналами до площі кола того самого діаметра $2c$:

$$Q_1 = \frac{\frac{\pi}{4}(D_0^2 - nd_0^2)}{\frac{\pi}{4}(2c)^2} = \frac{D_0^2 - nd_0^2}{(2c)^2}.$$

Характеристики форми мають вигляд:

$$\kappa = \frac{2\Pi_1 + Q_1}{Q_1} \beta,$$

$$\lambda = \frac{n-1-2\Pi_1}{2\Pi_1 + Q_1} \beta,$$

$$\mu = -\frac{n-1_1}{2\Pi_1 + Q_1} \beta^2,$$

де n – число каналів.

Перенісши початок координат у точку розпаду ($s_s = 1$, $\psi = \psi_s$), матимемо:

$\psi - \psi_s = \kappa_2(z-1)[1 + \lambda_2(z-1)]$, причому z змінюється від 1 до z_k і ψ від ψ_s до 1. Диференціюючи вираз по z :

$$\frac{d\psi}{dz} = \kappa_2[1 + 2\lambda_2(z-1)].$$

Для визначення κ_2 і λ_2 необхідні 2 умови:

– при $z = z_k$ ψ_k повинно бути таким, що дорівнює 1.

– при $z = z_k$ поверхня горіння σ повинна звернутися в 0 або $(\frac{d\psi}{dz})_k = 0$].

Одержуємо два рівняння:

$$1 - \psi_s = \kappa_2(z_k - 1)[1 + \lambda_2(z_k - 1)],$$

$$1 + \lambda_2(z_k - 1) = 0.$$

Вирішуючи ці два рівняння, знаходимо

$$\lambda_2 = - \frac{1}{2(z_k - 1)};$$

$$\kappa_2 = \frac{2(1 - \psi_s)}{z_k - 1}.$$

4.8. Фізичний закон горіння пороху

По мірі впровадження в практику нових форм порохів (довга трубка з каналом, зерна з багатьма вузькими каналами, флегматизовані порохи) і по мірі ускладнення артилерійської техніки (збільшення габаритів камори і каналу ствола) стали накопичуватися факти, які показують, що геометричний закон горіння не зовсім відповідає дійсності, оскільки в деяких випадках спостерігаються значні відхилення горіння порохів від геометричного закону горіння [1, 3–7].

Виявилось, що маса пороху, одержувана при його фабрикації, не цілком однорідна і розміри окремих зерен заряду відхиляються від середнього. Процес горіння залежить від об'єму і середовища, в яких проходить горіння.

Застосувавши більш досконалі методи реєстрації кривої тиску, вдалося встановити на досвіді, що займання не відбувається миттєво. Воно залежить від природи і складу продуктів горіння запальника, від природи займистого пороху, від форми і розміщення порохових елементів, що становлять заряд, від стану поверхні порохових елементів.

У результаті дійсне горіння пороху навіть простої форми виходить більш дегресивним, ніж повинно бути за геометричним законом горіння.

Аналізуючи вигляд кривих p , t , які одержані при спалюванні пороху в манометричній бомбі, Шарбоньє запропонував свою залежність σ від ψ у вигляді так званої «функції форми»:

$$\sigma = (1 - \psi)^\beta,$$

$$\beta = \frac{p_{\max} - p_i}{p_i}.$$

Величина β визначається з досліду в бомбі за співвідношенням найбільшого тиску p_{\max} і тиску в точці перегину p_i кривої p , t .

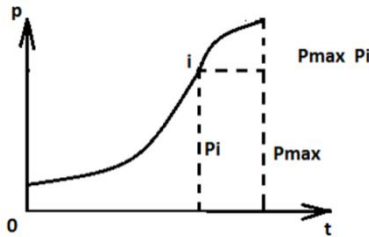


Рисунок 20 – Крива p , t із точкою перегину

Пізніше в 1936 році М. Є. Серебряков запропонував для показника β вираз:

$$\beta = \frac{2|\lambda|}{\kappa} + \frac{150 - p_e}{2000},$$

який враховував і вплив форми пороху, і вплив неоднорідного займання при малих тисках запальника.

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} (1 - \psi)^\beta A p^\nu - \text{закон швидкості газоутворення}$$

у формі Шарбоньє,

де A , β , ν – визначаються експериментально для кожного пороху з використанням манометричної бомби.

Сукупність усіх уявлень про дійсний закон горіння порохів, одержаних на основі обробки дослідних кривих тиску в манометричній бомбі і результатів стрільб, називають фізичним законом горіння. За суттю, він є експериментальним законом. При розробленні методики аналізу горіння пороху та впливу на нього різних факторів було застосовано спеціальну дослідну

характеристику прогресивності горіння $\Gamma_{on} = \frac{1}{p} \frac{d\psi}{dt}$, яка являє собою приведену до $p=1$ швидкість або інтенсивність газоутворення. Усі входні в неї величини знімаються з кривою тиску p , t , одержуваної при дослідах у бомбі.

Величина $\frac{d\psi}{dt}$, яка при геометричному законі горіння

виражалася формулою $\frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1 p$, залежить від тиску. За

міру прогресивності бралася величина σ або пропорційна їй величина $\frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1$,

де $\frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1 = \frac{\chi}{e_1} u_1 = \frac{\chi}{I_k}$ – постійна величина («жвавість»

пороху, що характеризує початкову інтенсивність газоутворення при $p=1$).

Величина $\frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1$, яку позначимо через Γ_m або

$\Gamma_m = \frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1$, характеризує інтенсивність газоутворення, тому

являє собою відносний об'єм пороху, згорілого в одиницю часу

$\frac{s_1}{\Lambda_1} u_1$ при тиску $p=1$. Значення Γ_m можна розрахувати за заданими розмірами і формою пороху, взявши певне значення для u_1 .

4.9. Застосування дослідної характеристики Γ_{on} для аналізу горіння порохів

Дослідження показали, що дослідна функція Γ є хорошим аналізатором горіння порохів, і її використання дозволяє провести балістичний аналіз горіння порохів, тобто з'ясувати на досліді вплив різних чинників на дійсний закон утворення газів.

Основним критерієм справедливості геометричного закону горіння пороху є рівність

$$\Gamma_{on} = \Gamma_m.$$

Функція $\Gamma_m = \frac{s_1}{\Lambda_1} \sigma u_1$ розраховується заздалегідь за формою і розмірами пороху і величиною u_1 і може бути побудована у вигляді графіка Γ, ψ .

Якщо крива $\Gamma_{on} = \frac{1}{p} \frac{d\psi}{dt}$ всіма точками збігається з кривою Γ_ψ, ψ , то це є ознакою горіння пороху за геометричним законом горіння.

Якщо крива Γ_{on} не збігається з кривою Γ_m, ψ , то в місцях розходження існують відхилення від геометричного закону горіння.

4.9.1. Аналіз горіння порохів з простою формою зерна

Досліди показують, що короткі трубки, стрічки та великі квадратні пластинки піроксилінового пороху в основному дають однаковий характер відхилень від геометричного закону горіння і однаковий вигляд кривих Γ_{on}, ψ .

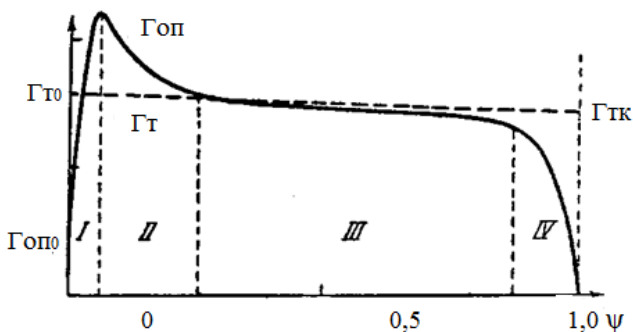


Рисунок 21 – Характеристика Γ , ψ для трубчастого пороху

Дійсне горіння пороху простої форми можна розділити на 4 фази:

I фаза – різке зростання Γ_{on} до найбільшої величини являє собою процес поступового займання пороху, який закінчується в момент досягнення Γ_{max} ;

II фаза – злет або перевищення Γ_{on} над Γ_m і поступове зниження злету – вказує на прискорене горіння зовнішніх шарів пороху при тисках до 600 кг/см^2 , яке поступово наближається до нормального;

III фаза – нормальне горіння, відповідне геометричному закону горіння;

IV фаза – швидке спадання Γ_{on} наприкінці горіння, тобто зменшення палаючої поверхні при поступовому догоранні все більш товстих елементів пороху після згорання елементів найменшої товщини.

4.9.2. Аналіз горіння прогресивних порохів

На діаграмі відсутня ділянка III збігу дослідних і теоретичних кривих Γ ; різко розходячись на початку горіння, після займання (ділянка 1) криві Γ_{on} йдуть весь час на спадання (ділянка 2), у той час як теоретичні криві Γ_m безперервно зростають до моменту розпаду. Дослідні криві зовсім не мають ділянки прогресивного горіння, незважаючи на прогресивність форми.

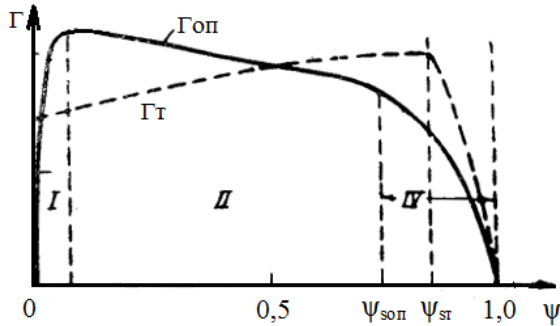


Рисунок 22 – Характеристика Γ , ψ для зерна з сімома каналами

Крім того, на відміну від теоретичних на дослідних кривих немає кутової точки в момент розпаду (ділянка IV). Порох прогресивної форми з вузькими каналами горить тим дегресивніше, чим прогресивніше його форма.

Таким чином, дійсне горіння таких порохів має зворотний характер порівняно з тим, яким воно повинно було б бути за геометричним законом горіння.

Основною причиною такого характеру горіння є різниця в умовах горіння всередині каналів пороху і на його зовнішній поверхні, що створює різницю тисків усередині каналу і зовні зерна, а це призводить до різниці у швидкостях горіння, причому ця різниця в тиску і швидкостях горіння тим більша, чим вузький й довший канали пороху.

Тема 5. ГОРІННЯ ПОРОХУ В ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ

План

- 5.1. Манометрична бомба.
- 5.2. Горіння пороху в постійному об'ємі.
- 5.3. Зв'язок між тиском і умовами заряджання при згорянні пороху в постійному об'ємі.
- 5.4. Загальна формула піростатики.
- 5.5. Облік впливу запальника на тиск газів.
- 5.6. Облік теплообміну в бомбі Вьеля.
- 5.7. Балістичний аналіз порохів за експериментами в манометричній бомбі.

5.1. Манометрична бомба

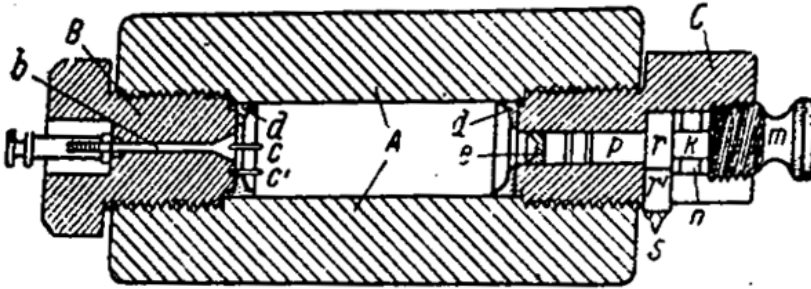


Рисунок 23 – Манометрична бомба при вивченні порохів

Манометрична бомба – лабораторний прилад, який служить для визначення величини і характеру наростання тиску, що розвивається газами, які утворюються при згорянні пороху або вибухових речовин у незмінному замкнутому об'ємі. Дає можливість визначити всі балістичні характеристики пороху. Головним завданням експерименту в МБ є одержання кривої p , t в аналоговому або табличному вигляді.

Бомба складається з порожнистого циліндра А кращої сталі з гвинтовою нарізкою на обох кінцях внутрішньої поверхні. З одного боку угвинчується запальна втулка, з іншого — поршнева втулка G з крешерним манометром. У запальній втулці є ізолюваний стрижень для підведення електричного струму, який запалює запал, другий провід підводиться безпосередньо до тіла бомби. Дротик, що з'єднує борни c , c' і перепалюється потім струмом, проходить через гільзу з цигаркового паперу, в якій міститься певна наважка запальника (піроксилін, чорний порох). Як правило, заряд досліджуваного пороху ініціюється за допомогою малої наважки пороху іншої природи, більш швидко палаючого. Найчастіше використовується ДРП, швидкість його горіння на порядок вище швидкостей горіння НЦП. У деяких випадках ініціювання проводиться за допомогою капсулів-запалювачів. У рідкісних випадках ініціювання проводиться розжареною спіраллю (дротиком).

У каналі крешерної втулки Z рухається поршень p , який передає тиск порохових газів крешерному стовпчику k з електролітичної червоної міді, інший кінець якого упирається у

головку вгвинченої пробки m , що служить як би ковадлом; для збігу осей поршня і крешера на останній надівається гумове кільце n , що центрує. Головка поршня r , яка стикається з крешером, має виступ r' , що виходить назовні та рухається за направляючим бічним прорізом у голівці поршневої втулки. До виступу прикріплено легке сталеве перо s , яке робить запис шляху поршня в функції часу на закопченому папері, наклеєному на барабан хронографа.

Для усунення прориву газів між стінками бомби і вгвинченими втулками служать мідні обтиральні кільця d , а частина каналу e , прилегла до поршня, заповнюється мастикою для запобігання поршня від безпосередньої дії газів високої температури.

5.2. Горіння порошу в постійному об'ємі

Для спрощення вивчення процесу горіння порошу виключають фактор зміни об'єму і вивчають горіння порошу в замкнутому об'ємі манометричної бомби.

Стан газу визначається його тиском p , питомим об'ємом w і абсолютною температурою T , які не є незалежними, а пов'язані рівнянням:

$f(p, w, T) = 0$, яке називається рівнянням стану газу.

Для «ідеальних» газів, молекули яких не мають об'єму та не притягують один одного, або ж для газів, досить розріджених, рівняння стану для одиниці ваги виражається формулою Клапейрона:

$$pw = RT,$$

де R – газова постійна. Підставляючи в рівняння стану нормальні значення p_N , T_N , w_N , одержимо:

$$R = \frac{p_N w_N}{T_N} = 3,785 \cdot 10^{-1} w_N.$$

Цей вираз дозволяє обчислити газову постійну, якщо відомий питомий об'єм газу при нормальних умовах. Оскільки доводиться мати справу з малими порівняно питомими об'ємами, то нехтувати об'ємом молекул не можна. Вплив об'єму молекул може бути враховано в деяких межах шляхом

зменшення питомого об'єму на деяку величину α , звану коволюмом. Із цією поправкою рівняння стану має вигляд:

$$p(w - \alpha) = RT.$$

Поправку на взаємодію молекул можна не вносити, так як при високих температурах вона незначна навіть при малих питомих об'ємах.

5.3. Зв'язок між тиском і умовами заряджання при згорянні пороху в постійному об'ємі

Уперше формулу для найбільшого тиску порохових газів при згорянні димного пороху дав Л. Н. Шишков [1, 3]

$$p_{\max} = \frac{RT_1}{w - \varepsilon},$$

де w – питомий об'єм порохових газів;

ε – об'єм твердих залишків, що виходять при згорянні 1 кг димного пороху.

Ван дер Ваальс на основі кінетичної теорії газів дав рівняння стану газів у вигляді:

$$p(w - b) = RT.$$

Це рівняння такого ж типу, що і формула Шишкова, але в ній врахований не об'єм твердих залишків, а об'єм газових молекул b , який впливає на тиск при високих тисках реальних газів. Із формули Ван дер Ваальса випливає

$$p = \frac{RT_1}{w - b}. \quad (5.1)$$

Незалежно від Ван дер Ваальса, проводячи досліди зі спалювання порохів у манометричній бомбі і визначаючи зв'язок між щільністю заряджання Δ і найбільшим тиском газів p_{\max} , який визначався циліндричними крешерними стовпчиками, Нобль і Абель дали таку емпіричну залежність:

$$p_{\max} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta},$$

де f і α – постійні коефіцієнти.

Замінивши Δ її виразом $\Delta = \frac{\omega}{W_0}$, одержимо

$$p_{\max} = \frac{f\omega}{W_0 - \alpha\omega} = \frac{f}{\frac{W_0}{\omega} - \alpha} = \frac{f}{w-b}. \quad (5.2)$$

Вираз для кінця горіння порошу можна записати у вигляді

$$p_{\max} = \frac{RT_1}{w-b},$$

де T_1 – температура горіння порошу або температура порохових газів у момент їх утворення.

Зіставляючи (5.1) і (5.2), одержимо

$$f = RT_1 \text{ і } \alpha = b.$$

Це зіставлення розкриває фізичний зміст констант f і α у формулі Нобля.

Надалі формулу $p_{\max} = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta}$ будемо називати формулою Шишкова–Нобля. Аналіз цієї формули показує, що при $\Delta = \frac{1}{\alpha}$ $p_{\max} \rightarrow \infty$. Інакше кажучи, крива $p_{\max} = f(\Delta)$ має асимптоту $\Delta_{\infty} = \frac{1}{\alpha}$. Для піроксилінових порохів $\alpha = 1 \text{ дм}^3/\text{кг}$ і $\Delta_{\infty} = 1 \text{ кг/дм}^3$. Практично у звичайних дослідах у бомбі беруть щільність заряджання не вище $\Delta = 0,25 \text{ кг/дм}^3$; при цьому $p_{\max} = 2800 - 3000 \text{ кг/см}^2$. Формула Шишкова – Нобля дає криву p_{\max} , Δ гіперболічного типу.

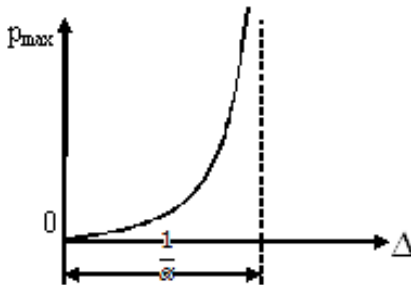


Рисунок 24 - Залежність p_{\max} від Δ за формулою Шишкова – Нобля

5.4 Загальна формула піростатики

Піростатикою називається розділ внутрішньої балістики, що вивчає закони горіння пороху в замкнутому об'ємі постійної величини. В умовах горіння пороху в постійному об'ємі в манометричній бомбі кількість газів безперервно і дуже швидко зростає, причому одночасно змінюються і тиск, і питомий об'єм газів [7–9].

Тому, щоб скласти рівняння стану для поточного моменту, беремо припущення:

- при горінні пороху в кожен даний момент часу газ знаходиться в рівноважному стані;
- теплообміну порохових газів зі стінками МБ немає.

Загальною формулою піростатики називається вираз, що визначає тиск p для будь-якого проміжного моменту горіння, коли згоріла лише частина заряду. Ця формула може бути одержана з формули Нобля.

Нехай до даного моменту згоріла частина заряду w_{cz} кг. Відношення ваги згорілої частини заряду до первісної ваги заряду позначимо через ψ

$$\psi = \frac{w_{cz}}{w}.$$

ψ – відносна вага згорілої частини заряду. Очевидно, що на початку горіння $\psi = 0$, наприкінці горіння $\psi = 1$. Виразимо вагу згорілої частини заряду через змінну величину ψ

$$w_{cz} = w\psi.$$

Чисельник у формулі Нобля набире вигляду

$$f w_{cz} = f w \psi.$$

Вільний об'єм камери в проміжний момент вийде, якщо з об'єму камери W_0 відняти об'єм незгорілої частини пороху і коволюма згорілого пороху.

Об'єм незгорілої частини пороху дорівнює

$$\frac{(1-\psi)w}{\delta},$$

де $(1-\psi)w$ – вага незгорілої частини; δ – щільність пороху. Коволуом згорілого пороху $\alpha w \psi$ (дм³).

Отже, вільний об'єм камори в проміжний момент горіння дорівнює

$$W_{\psi} = W_0 - \frac{(1-\psi)w}{\delta} - \alpha w \psi .$$

Таким чином, для моменту, коли згорить частина пороху ψ , одержимо

$$p = \frac{fw\psi}{W_{\psi}} = \frac{fw\psi}{W_0 - \frac{(1-\psi)w}{\delta} - \alpha w \psi} ,$$

або, роблячи перетворення в знаменнику,

$$p = \frac{fw\psi}{W_0 - \frac{w}{\delta} - (\alpha - \frac{1}{\delta})w\psi} .$$

Ця формула носить назву загальної формули піростатики або узагальненої формули Нобля.

Коли згорить весь заряд ($\psi = 1$), тоді ця формула перетворюється у звичайну формулу Нобля, так як в кінці горіння $p = P$.

Розділивши чисельник і знаменник загальної формули піростатики на w і помічаючи, що $\frac{W_0}{w} = \frac{1}{\Delta}$, одержуємо

$$p = \frac{f\psi}{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta} - (\alpha - \frac{1}{\delta})\psi} .$$

Якщо відомо тиск p в деякий момент горіння, то, користуючись загальною формулою піростатики, можна знайти відносну вагу ψ згорілої частини заряду

$$\psi = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\alpha - \frac{1}{\delta} + \frac{f}{p}} .$$

Вільний об'єм камори або бомби під час горіння пороху по мірі збільшення ψ змінюється:

Межі зміни

Початок горіння	Поточний момент	Кінець горіння
$\psi = 0$	$0 < \psi < 1$	$\psi = 1$
$W_0 - \frac{w}{\delta}$	$W_0 - \frac{w}{\delta}(1 - \psi) - \alpha w \psi$	$W_0 - \alpha w$

Вільний об'єм камери або бомби по мірі горіння порошу убуває, в бомбі стає «тісніше», так як об'єм газових молекул більший, ніж об'єм твердого, ще не згорілого порошу.

$\frac{w}{\delta}$	$W_{\Delta} = W_0 - \frac{w}{\delta}$	$\psi = 0$ (початок горіння)
$\frac{w}{\delta}(1 - \psi)$	$\alpha w \psi$	W_{ψ}
αw	$W_1 = W_0 - \alpha w$	$\psi = 1$ (кінець горіння)
W_0		

Із схеми випливає, що $W_{\Delta} > W_{\psi} > W_1$.

Рисунок 25 - Схема зміни вільного об'єму бомби при горінні порошу

5.5. Облік впливу запальника на тиск газів

Часто при досліді у бомбі запальник має іншу природу порівняно з природою основного заряду. Нехай відомі характеристики запальника і основного заряду.

Сумарний тиск з урахуванням тиску запальника одержимо за формулою:

$$p_{\psi}' = \frac{fw\psi + f_g w_g}{W_0 - \frac{w}{\delta}(1 - \psi) - \alpha w \psi - \alpha_g w_g} = p_{\psi} + p_g.$$

Величиною $\alpha_g w_g$ нехтують через малість.

$$p_{\psi} = \frac{f w \psi}{W_{\psi}} - \text{тиск порохових газів заряду без урахування}$$

тиску запальника;

$$p_{\epsilon} = \frac{f_{\epsilon} w_{\epsilon}}{W_{\psi}} - \text{тиск газів запальника у вільному об'ємі}$$

бомби.

Так як W_{ψ} убуває, то p_{ϵ} дещо зростає, але сам тиск запальника невеликий (20–50 кг/см²). Тому його зміною нехтують і розраховують $p_{\epsilon 0}$ для початку горіння пороху:

$$p_{\epsilon 0} = \frac{f_{\epsilon} w_{\epsilon}}{W_0 - \frac{w}{\delta}} = \frac{f_{\epsilon} w_{\epsilon}}{1 - \frac{\Delta}{\delta}}.$$

Тоді залежність

$$p'_{\psi} = p_{\epsilon} + \frac{f \Delta \psi}{1 - \frac{\Delta}{\delta} - \Delta(\alpha - \frac{1}{\delta}) \psi}$$

представляє собою вираз для тиску порохових газів з урахуванням газів запальника.

Знаючи w або Δ і характеристики пороху, за цією формулою можна розрахувати величину p'_{ψ} для будь-якого значення ψ . Частіше цю формулу застосовують для рішення зворотної задачі, так як для даного досліду в бомбі p' буває відомо за кривою тиску p, t .

Зворотна залежність ψ від p :

$$\psi = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p'_{\psi} - p_{\epsilon}} + \alpha - \frac{1}{\delta}}.$$

5.6. Облік теплообміну в бомбі В'єля

При горінні пороху в замкнутому об'ємі частина теплової енергії витрачається на нагрівання стінок бомби. Внаслідок

цього і найбільший тиск газів, і проміжні поточні тиски виходять дещо меншими, ніж тиски, які були б, якщо б частина енергії не губилася на нагрівання стінок. Втрата на тепловіддачу враховується формулою Ньютона:

$$dQ = \alpha F (T_z - T_{cm}) dt = \alpha_0 F \gamma (T_z - T_{cm}) dt,$$

де dQ – кількість тепла, що віддається стінкам за час dt ;

F – величина поверхні охолодження;

α_0 – коефіцієнт тепловіддачі, пропорційний щільності газів γ і залежить від матеріалу стінки ($\alpha = \alpha_0 \gamma$);

T_z – температура газів;

T_{cm} – температура охолоджуючої стінки.

Різниця в тисках у звичайній манометричній бомбі і в бомбі, внутрішня поверхня якої покрита тонким шаром слюди, що погано проводить тепло, повинна відбитися на розрахунку величин балістичних характеристик f і α , які визначаються за дослідним значенням p_{\max} при різних щільностях заряджання.

Дослідження показали, що із зменшенням Δ відносна втрата на тепловіддачу зростає. При даній Δ пороху суворо одного і того самого складу із збільшенням товщини, тобто зі збільшенням часу горіння t_k , дають зниження величини максимального тиску.

При згорянні пороху при одній і тій самій щільності заряджання в бомбах різного об'єму тиск p_{\max} зростає із збільшенням об'єму бомби, оскільки при цьому зменшуються поверхня бомби, що припадає на одиницю ваги заряду, і тепловіддача.

Перша спроба експериментально одержати і теоретично обґрунтувати поправочні залежності для обліку втрат на тепловіддачу належить французькому досліднику Мюрауру.

На думку Мюраура, втрата на тепловіддачу пропорційна охолоджуючій поверхні бомби, тиску газів і часу їх дії на стінку. При змінному тиску втрата пропорційна поверхні бомби F_0 і

$\int_0^t p dt$. Величина $\int_0^t p dt$ не залежить від Δ ; для цього пороху

втрата тепла ΔQ через стінку F_{δ} постійна при будь-якому заряді ω або Δ . Повна ж кількість тепла, що виділяється, пропорційна вазі заряду ω , тому відносна втрата $\frac{\Delta Q}{Q}$ обернено пропорційна ω або Δ . Отже, $\frac{\Delta Q}{Q}$ пропорційна $\frac{F_{\delta}}{\omega} \int_0^t p dt$.

У теоретичних обґрунтуваннях Мюраур дещо видозмінив формулу Ньютона $dQ = \alpha_0 F \gamma (T_z - T_{cm}) dt$, замінивши її формулою $dQ = c_M F dt$, де $c_M = \alpha_0 \frac{\gamma}{p} (T_z - T_{cm})$ визначається спеціальними дослідженнями [1–4].

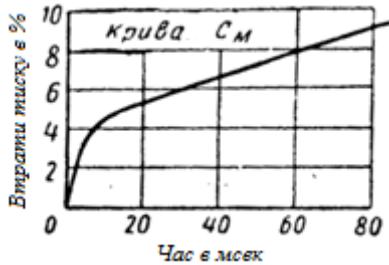


Рисунок 26 – Крива c_M , що характеризує втрати на тепловіддачу

Провівши велику кількість дослідів із порохами різної товщини і природи, Мюраур встановив в умовах горіння пороху в бомбі залежність втрати тиску $\frac{\Delta p_{\max}}{p_{\max}}$, % від часу згорання пороху t_k при $\Delta = 0,20$ кг/дм³ і при $\frac{F_{\delta}}{\omega} = 7,774$ см²/г. Одержані дані були нанесені на графік. Крива $\frac{\Delta p_{\max}}{p_{\max}}$ % або $\frac{\Delta T}{T}$ % у функції часу згорання t_k при $\Delta = 0,20$ кг/дм³ і була названа кривою c_M .

Втрату на тепловіддачу в інших умовах, тобто в іншій бомбі і при іншій щільності заряджання, знаходять за формулою

$$\frac{\Delta p_{\max}}{p_{\max}} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{c_M}{7,774} \frac{F_{\delta}}{w} = \frac{c_M}{7,774} \frac{F_{\delta}}{W_0} \frac{1}{\Delta} \%,$$

де c_M і $\frac{\Delta p_{\max}}{p_{\max}}$ в %.

І абсолютну поправку до тиску одержують у вигляді

$$\Delta p_{\max} = \frac{c_M}{7,774} \frac{F_{\delta}}{W_0} \frac{p_{\max}}{\Delta}.$$

Але

$$\frac{p_{\max}}{\Delta} = \frac{f}{1 - \alpha \Delta},$$

$$\text{тому } \Delta p_{\max} = \frac{c_M}{7,774} \frac{F_{\delta}}{W_0} \frac{f}{1 - \alpha \Delta}. \quad (5.3)$$

Отже, абсолютна поправка до тиску на тепловіддачу залежить від природи і часу згоряння пороху, що враховується величиною c_M , від оголеності бомби і щільності заряджання Δ , причому величина обернено пропорційна значенню $(1 - \alpha \Delta)$. Коефіцієнт c_M залежить від товщини і природи пороху.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта c_M для піроксилінових порохів

Товщина пороху $2e_I$, мм	Швидкість горіння $u_I \cdot 10^7 \frac{\text{дм/с}}{\text{кг/дм}^2}$	Втрати на тепловіддачу c_M , %
0,3	90	1,5
0,3 (флегматизований)	70	2
0,4	80	2,6
1	75	4
2	72	5
4	69	6,1

За допомогою таблиці за формулою (5.3) обчислюється поправка Δp_{\max} до максимального тиску на тепловіддачу при згорянні пороху в бомбі.

Для проміжних точок кривої тиску величина поправки буде пропорційна величині імпульсу тиску в даний момент, а він у свою чергу пропорційний величині $\frac{p' - p_6}{p'_{max} - p_6}$.

Так як відношення $\frac{p' - p_6}{p'_{max} - p_6}$ близьке до відповідної величини ψ , то проміжні поправки на тепловіддачу можна визначити за формулою

$$\Delta p'_x = \Delta p'_{max} \frac{p' - p_6}{p'_{max} - p_6}$$

Таким чином, кожний вимірний тиск (p') необхідно помножити на величину $1 + \frac{\Delta p'_{max}}{p'_{max} - p_6}$. У результаті одержимо значення тиску для адіабатичних умов, після чого можна приступати до визначення балістичних характеристик пороху.

5.7. Балістичний аналіз порохів за експериментами в манометричній бомбі

Балістичні характеристики пороху – сила f і коволюм α – визначаються з дослідів в бомбі при двох щільностях заряджання за 3 – 5 дослідями для кожної. Будують пряму за 2 точками:

$$\left(p_{max 1}, \frac{p_{max 1}}{\Delta_1} \right);$$

$$\left(p_{max 2}, \frac{p_{max 2}}{\Delta_2} \right).$$

Для кожного пороху виходить своя характеристична пряма зі своїми значеннями f і α .

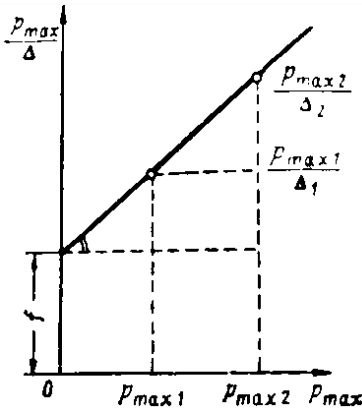


Рисунок 27 – Графічне визначення сили пороху і коволюма

Визначивши $p_{\max 1}$ і $p_{\max 2}$ і розрахувавши $\frac{p_{\max 1}}{\Delta_1}$ і $\frac{p_{\max 2}}{\Delta_2}$, одержимо

$$\alpha = \frac{\frac{p_{\max 2}}{\Delta_2} - \frac{p_{\max 1}}{\Delta_1}}{p_{\max 2} - p_{\max 1}};$$

$$f = \frac{p_{\max 1}}{\Delta_1} - \alpha p_{\max 1}.$$

В одержанні під час дослідів f і α вводяться поправки на тепловіддачу і визначаються виправлені значення f_0 і α_0 .

Швидкість горіння u_1 при тиску $p=1$ визначається на підставі обробки інтегральної кривої I, ψ . За збігом або розбіжністю інтегральних кривих при різних Δ визначається закон швидкості горіння.

Дійсне горіння пороху характеризується дослідною кривою інтенсивності газоутворення $\Gamma_{on} = \frac{1}{p} \frac{d\psi}{dt}$ та

інтегральною кривою $I = \int_0^t p dt$ у функції ψ .

Крива Γ , ψ є гарним аналізатором процесів, що проходять при горінні пороху, та дозволяє врахувати вплив різних факторів, які іншими методами виявити було неможливо.

Для дослідження дійсного горіння пороху необхідно проводити досліди не за однією, а при різних щільностях заряджання, щоб врахувати вплив зміни Δ на зміну інтенсивності газоутворення Γ і на величину імпульсу тиску I , ψ [4 – 6]. Такі досліди дозволяють визначити характер зміни газоутворення і при пострілі з гармати. Цей метод дослідження і визначення балістичних характеристик називається методом балістичного аналізу порохів. Він дозволяє з дослідів у бомбі при різних щільностях заряджання визначити дійсний закон горіння пороху, а потім, застосувавши його в умовах знаряддя, розв'язати пряму задачу внутрішньої балістики з урахуванням особливостей горіння цього зразка.

Тема 6. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЯВИЩА ПОСТРІЛУ ДО ВИЛЬОТУ СНАРЯДА З КАНАЛУ СТВОЛА

План

- 6.1. Поняття про наведену довжину камори.
- 6.2. Періоди явища пострілу.
- 6.3. Рівняння балансу енергії при пострілі.
- 6.4. Рівняння стану порохових газів для змінного об'єму.
- 6.5. Основні енергетичні характеристики пострілу.
- 6.6. Вираз для коефіцієнта фіктивності маси снаряда.

6.1. Поняття про наведену довжину камори

Тиск у каналі знаряддя ϵ , в числі інших, функцією від об'єму заснарядного простору, що відповідає положенню снаряда в каналі в даний момент. Цей об'єм W на початку горіння пороху дорівнює об'єму камори W_0 , а потім по мірі руху снаряда збільшується на об'єм, що дорівнює об'єму циліндра, що має основою переріз знаряддя s , включаючи нарізи, а висотою – довжину шляху снаряда l :

$$W = W_0 + sl.$$

Так як на практиці, як правило, виражають тиск у функції не від об'єму, а від шляху, що проходить снаряд, то зручніше замінити всі об'єми відповідними довжинами. Але так як перерізи камери в різних місцях неоднакові і більші, ніж перетин каналу знаряддя, то об'єми камери і каналу не пропорційні дійсним довжинам. Тому для зручності операцій із формулами, які виходять в подальшому в піродинаміці, вводять «наведені довжини», замінюючи у формулі об'єм камери рівновеликим об'ємом циліндра, що має основою площу перерізу каналу знаряддя s . Довжина цього циліндра називається «приведеною довжиною камери», позначається через l_0 і визначається виразом $l_0 = \frac{W_0}{s}$.

Так як дійсний перетин камери більший s , то наведена довжина l_0 буде більшою, ніж дійсна довжина камери l_{km} .

Об'єм заснарядного простору подається тепер у вигляді

$$W = sl_0 + sl = s(l_0 + l).$$

Вільний об'єм заснарядного простору за вирахуванням об'єму ще незгорілого пороху і коволюма згорілої частини виражатиметься так:

$$W_0 + sl - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega\psi = W_\psi + sl$$

або може бути поданий у вигляді суми

$$sl_\psi + sl = s(l_\psi + l),$$

$$\text{де } l_\psi = \frac{W_\psi}{s} = \frac{W_0 - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega\psi}{s} = l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\delta} - \Delta \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \psi \right] -$$

приведена довжина вільного об'єму камери в даний момент.

6.2. Періоди явища пострілу

У балістиці постріл розглядається як процес дуже швидкого перетворення потенційної енергії пороху в кінетичну енергію руху зброї.

Суттєвою особливістю пострілу є те, що робота порохівих газів з переміщення снаряда відбувається в змінному

об'ємі. Всі ці особливості надзвичайно ускладнюють дослідження явища пострілу, і щоб одержати загальну картину явища, доводиться розглядати його за частинами. Тому весь комплекс процесів, що відбуваються при пострілі, внутрішня балістика поділяє на ряд окремих питань, а саме явище пострілу ділиться на чотири періоди:

- попередній;
- перший (основний);
- другий;
- третій (післядія на снаряд і стовбур).

Попередній або піростатичний період – від моменту початку запалення заряду до моменту врізання снаряда (кулі в нарізи ствола).

У деякій літературі цей період поділяють на два [1, 7]:

- попередній або піростатичний період – від моменту початку запалення заряду до моменту початку руху снаряда;
- період форсування - від моменту початку руху до закінчення врізання ведучих поясків снаряда (кулі в нарізи).

При розгляді цього періоду припускають, що горіння пороху відбувається в постійному об'ємі. Цей етап закінчується, коли тиск на дно снаряда достатній для початку врізання провідного паска в нарізи. З цього моменту починається фактичний рух снаряда. Заснарядний об'єм постійно зростає. Відрізок часу, впродовж якого відбувається повне врізання паска називається періодом форсування. Тиск газів на момент закінчення періоду форсування називається тиском форсування. Для існуючих ствольних систем він дорівнює 250–700 кг/см². Величина тиску форсування істотно впливає на характер функцій $P(l)$, $V(l)$.

Період форсування складний для точного аналізу. Об'єм у цей період збільшується незначно, а сам цей період короткий, тому, допускаючи невелику похибку вважають: порохований заряд горить у постійному об'ємі; рух снаряда починається в момент досягнення тиску форсування.

Перший період, або основний (гіродинамічний період) – період горіння порохового заряду в змінному об’ємі. Перший період є найбільш тривалим і найбільш складним. Період починається з моменту досягнення тиску форсування і закінчується в момент закінчення порохового заряду, коли припиняють надходити порохові гази або ювенільні. У цей період гази здійснюють понад 2/3 всієї роботи. При горінні пороху в змінному об’ємі одночасно відбувається 2 процеси.

За снарядом в просторі перебувають порохові гази.

Прискорено зростає об’єм простору внаслідок руху снаряда. На початку руху, коли швидкість руху снаряда мала, вирішальне значення має перший процес. Тиск за снарядом швидко зростає, а по мірі збільшення швидкості снаряда, зростання тиску зменшується. У момент рівності дії обох процесів тиск у каналі ствола досягає свого максимального значення. Після цього переважаюче значення має другий процес. Тиск за снарядом зменшується. Тиск p_{\max} є найважливішою характеристикою ствольної системи.

Другий період – період адіабатичного розширення газів за снарядом простору. Починається в момент закінчення горіння і закінчується в момент вильоту снаряда з каналу ствола. Упродовж цього періоду відбувається розширення сильно стиснутих нагрітих газів і подальше зростання швидкості снаряда. У цей період тиск убуває від p_k до тиску дульного p_d . Величина дульного тиску у різних зразків зброї коливається в межах 300 – 600 кг/см².

У зв’язку з великою швидкістю руху снаряда другий період досить нетривалий, тому теплообміном порохових газів зі стінками каналу ствола нехтують і вважають процес розширення газів адіабатичним.

Явища, що відбуваються в ній, значно простіші явищ, що відбуваються в інших частинах, так як тут відсутній приплив нових газів і явище являє собою, за суттю, чисто фізичний процес розширення певної кількості сильно стиснутих і сильно нагрітих газів.

Третій період – починається в момент вильоту снаряда з каналу ствола і закінчується в момент припинення дії порохових

газів на снаряд $p_{сн} = p_a$ і ствол $p_{дн} \approx 20 \text{ кг/см}^2$. Результатом післядії на снаряд є досягнення максимального значення швидкості снаряда, яке щодо зовнішньої балістики називається початковою швидкістю снаряда $v_{\max} = v_0$. Період післядії закінчується при падінні тиску в каналі ствола приблизно 1 кг/см^2 .

Крім зазначених вище основних процесів, під час пострілу відбувається ще ряд побічних процесів, які також впливають на загальний хід явищ.

6.3. Рівняння балансу енергії при пострілі

При пострілі значна частина енергії порохових газів витрачається на здійснення роботи і перетворюється в кінетичну енергію руху снаряда. Крім цього, деяка частина енергії витрачається на здійснення інших робіт, менш значних, але які необхідно врахувати, щоб дати аналіз балансу енергії при пострілі.

Для кількості газів $\omega\psi$ справедливий перший закон термодинаміки:

$$dQ = dU + AdL.$$

Кількість тепла, що прийшла з ювенільним газом, витрачається на підвищення внутрішньої енергії порохових газів та на здійснення різних видів механічних робіт:

A – термічний еквівалент роботи;

$L = \sum L_i$ – сума робіт, які здійснюються газами при пострілі, у тому числі робота, що витрачається на подолання шкідливих опорів;

$$dQ = d(\bar{c}_{\omega 1} T_1 \omega\psi) = \bar{c}_{\omega 1} T_1 \omega d\psi, \quad (6.1)$$

$\bar{c}_{\omega 1}$ – питома середня ізохорна теплоємність порохових газів в інтервалі температур від 273 К до T_1 ;

T_1 – температура горіння і ювенільних газів.

За той самий час змінюється внутрішній об'єм газів.

$$dU = d(\bar{c}_{\omega} T \omega\psi) = \bar{c}_{\omega} \omega d(T\psi), \quad (6.2)$$

\bar{c}_{ω} – питома середня ізохорна теплоємність порохових газів в інтервалі температур від 273 К до T .

Сума робіт $\sum L_i$ включає 9 видів робіт.

L_1 – основна робота (головна), робота, що витрачається на повідомлення снаряда поступального руху. Ця робота являє собою енергію порохового заряду, що використовується корисно:

$$L_1 = \frac{mv^2}{2}$$

L_2 – робота, затрачувана на повідомлення снаряду обертового руху;

L_3 – робота, що витрачається на подолання тертя між паском снаряда і внутрішньою поверхнею каналу (канал плюс нарізи), а також на подолання тертя між стінками снаряда і полями нарізів;

L_4 – робота, що витрачається на переміщення за каналом ствола газів порохової суміші. Ця робота особливо істотна для потужних гармат, коли вага заряду і вага снаряда приблизно однакова;

L_5 – робота, що витрачається на переміщення відкатних частин гармати (на перезаряджання шляхом переміщення затвора або ствола відноситься сюди ж);

L_6 – робота, затрачувана на пластичну деформацію провідного паска при врзанні в наріз каналу ствола;

L_7 – робота, що витрачається на подолання снарядом опору повітря і на витіснення стовпа повітря, що знаходиться в каналі з зарядом перед снарядом;

L_8 – робота, еквівалентна втратам на тепловіддачу;

L_9 – робота, еквівалентна втратам тепла з газами, що прорвалися вперед снаряда (істотна для зношених стовбурів).

Доведено, що роботи L_2 , L_3 , L_4 , L_5 – пропорційні головному виду роботи L_1 . Отже, існують коефіцієнти пропорційності K_2 , K_3 , K_4 , K_5 .

Тоді сума робіт, які здійснюються газами при пострілі,

$$\sum_{i=1}^5 L_i = (1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5) \frac{mv^2}{2}.$$

Сума коефіцієнтів у цьому виразі позначається через φ :

$(1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5) = \varphi$ – коефіцієнт обліку дугорядних робіт.

З іншого боку, якщо $\varphi m = M$, то

$$\sum_{i=1}^5 L_i = \frac{\varphi mv^2}{2} = \frac{Mv^2}{2}, \quad (6.3)$$

де M – фіктивна маса.

Роботи L_6 , L_8 , як правило, враховуються побічно, а роботи L_7 , L_9 малі, тому їх найчастіше не враховують. Таким чином, величиною φ визначають навантаження на корисну роботу. Числова величина φ для звичайних знарядь залежно від умов заряджання коливається в межах 1,05 – 1,2, але може бути і більшою.

Підставивши у вираз для першого закону термодинаміки рівняння (6.1), (6.2), (6.3), одержимо

$$\begin{aligned} \overline{c_{\omega 1}} \omega_1 T_1 d\psi - \overline{c_{\omega}} \omega d(T\psi) &= A d\varphi \frac{mv^2}{2}. \\ \overline{c_{\omega 1}} \omega_1 T_1 \int_0^{\psi} d\psi - \overline{c_{\omega}} \omega \int_0^{T\psi} d(T\psi) &= A \int_0^{\psi} d\varphi \frac{mv^2}{2}. \end{aligned}$$

Після інтегрування одержимо

$$\overline{c_{\omega 1}} \omega_1 T_1 \psi - \overline{c_{\omega}} \omega (T\psi) = A \varphi \frac{mv^2}{2}. \quad (6.4)$$

Як правило, $\overline{c_{\omega 1}}$ і $\overline{c_{\omega}}$ прив'язують до середньої температури і цю прив'язану величину позначають c_{ω} – середня ізохорна питома теплоємність порохових газів в інтервалі температур від 273 К до T_{cp} . З (6.4) випливає, що різниця теплових станів газів порохової суміші визначає роботу з метання снаряда.

6.4. Рівняння стану порохових газів для змінного об'єму

Піродинаміка – розділ внутрішньої балістики, що вивчає горіння пороху в змінному об'ємі.

Рівняння балансу енергії дає зв'язок між згорілою частиною заряду ψ , швидкістю снаряда v і температурою газів, що утворилися до даного моменту і перебувають у заснарядному просторі. Ні довжина шляху снаряда l , ні тиск газів p сюди не входять. Між основним завданням піродинаміки є знаходження залежності між довжиною шляху l , що проходить снаряд, швидкістю його v і тиском p , який здійснюють гази на снаряд і на стінки каналу ствола. Тому рівняння балансу енергії необхідно перетворити так, щоб воно давало зв'язок між зазначеними величинами p , v , l .

Із термодинаміки відомо, що

$$c_p - c_w = AR = \frac{R}{\Theta},$$

звідки

$$\Theta = \frac{R}{c_p - c_w};$$
$$\Theta c_w = \frac{R c_w}{c_p - c_w} = \frac{R}{\frac{c_p}{c_w} - 1} = \frac{R}{k - 1},$$

де R – газова постійна;

$\frac{c_p}{c_w} = k$ – відношення теплоємностей (показник адіабати).

Введемо для спрощення позначення $k - 1 = \theta$, тоді

$$\Theta c_w = \frac{R}{\theta},$$
$$\theta = \frac{c_p - c_w}{c_w} = \frac{A_2 + bT - A_1 - bT}{A_1 + bT} = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + bT}.$$

Величина θ – слабо спадна функція температури. При зміні температури газів від T_1 до T_D середньому значенню температури $T_{cp} = \frac{T_1 + T_D}{2}$ і відповідному значенню c'_w буде відповідати середнє значення θ' :

$$\theta' = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + b \frac{T_1 + T_D}{2}} = \frac{1}{A + BT_{cp}},$$

$$\text{де } A' = \frac{A_2}{A_2 - A_1} \text{ і } B' = \frac{b}{A_2 - A_1}.$$

Тоді

$$\mathcal{E}c'_w = \frac{R}{\theta'}.$$

Підставляючи цей вираз у рівняння балансу енергії, одержимо

$$\frac{R}{\theta'} T_1 \omega \psi - \frac{R}{\theta'} T \omega \psi = \frac{\varphi m v^2}{2}.$$

Вираз можна замінити, використовуючи рівняння стану порохових газів для моменту часу, що відповідає згорілій частині заряду ψ :

$$pW = RT\omega\psi,$$

де W – вільний об'єм заснарядного простору. У розглянутий момент часу

$$W = W_0 + sl - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega\psi = W_\psi + sl.$$

Тут W_ψ – вільний об'єм камери до моменту згорання в ній частини заряду ψ ;

s – переріз каналу ствола;

sl – об'єм каналу ствола, що прибавляється в результаті переміщення снаряда на відстань l .

При користуванні рівнянням стану газу потрібно мати на увазі, що в термодинаміці воно було встановлено для певних кількостей газів, що знаходяться у стаціонарній рівновазі.

Допускаємо, що це рівняння справедливо і в умовах безперервного утворення газів, і при безперервно змінному тиску газів і зайнятого ними об'єму, тобто фактично при нерівноважному стані газу. Маючи також на увазі, що $RT_1 = f$,

$$\text{одержимо } \frac{f}{\theta'} \omega \psi - \frac{p(W_\psi + sl)}{\theta'} = \frac{\varphi m v^2}{2}.$$

Це і є основне рівняння внутрішньої балістики для знаряддя, що дає зв'язок між змінними ψ , p , v , l . Насправді, воно є рівнянням перетворення енергії.

Ліва частина його представляє зміну внутрішньої енергії $\omega \psi$ кг порохів газів при зниженні їх температури від T_1 до T при прийнятті середнього значення для теплоємності c_w' і θ' . У правій частині стоїть сума зовнішніх робіт, що здійснили порохіві гази до даного моменту за рахунок зміни їх теплового стану.

Всі члени рівняння виражаються в одиницях роботи (кг•дм). Іноді це рівняння називають рівнянням еквівалентності. Як правило, величину переносять у праву частину і вирішують рівняння відносно другого члена:

$$p(W_\psi + sl) = f\omega\psi = \frac{\theta'}{2} \varphi m v^2$$

або, замінюючи W_ψ через sl_ψ , матимемо:

$$ps(l_\psi + l) = f\omega\psi = \frac{\theta'}{2} \varphi m v^2.$$

Це рівняння відоме також під ім'ям рівняння Резаля.

6.5. Основні енергетичні характеристики пострілу

Постріл, метальний заряд, ствольну систему необхідно оцінювати на порівняльній основі з тим, щоб можна було говорити про досконалість об'єкта або його слабкості. У зв'язку з цим у балістиці існує 6 енергетичних характеристик [8].

Можлива робота порохів газів

Із рівняння балістичної енергії одержимо

$$\frac{RT_1}{\theta} \omega \psi \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) = \frac{\varphi m v^2}{2},$$

$$\frac{RT_1}{\theta} \omega \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) = \frac{\varphi m v^2}{2} - \text{при повному згорянні пороху.}$$

У правій частині рівняння стоїть сума зовнішніх робіт, які здійснюються пороховими газами при пострілі: вона зростає з убуттям температури, і найбільшої величини досягла б, якби можна було охолодити порохові гази при пострілі до $T = 0$ і

одержати $\frac{f\omega}{\theta} = \frac{\varphi m v_{np}^2}{2}$. Практично це зробити неможливо.

Цей вираз дає теоретичну межу.

v_{np} – гранична швидкість, яка розраховується теоретично;

v_d – практична швидкість, приблизно дорівнює v_{np} . Тому оцінка значень v_{np} має практичний сенс;

$\frac{f\omega}{\theta}$ – потенціал заряду маси (повний запас енергії). Як

граничне має лише теоретичне значення, так як на практиці можна одержати при пострілі охолодження газів до абсолютного нуля, тим не менше воно показує, що можна збільшити працездатність порохових газів або за допомогою збільшення сили, або зменшенням величини θ . Збільшити ж силу пороху можна або збільшивши питомий об'єм порохових газів, або підвищивши температуру горіння пороху. Величина θ залежить від складу і температури газів: зменшується зі збільшенням температури. Так як при пострілі температура газів убиває, то θ при пострілі змінюється. Але так як ці зміни невеликі, то, як правило, θ беруть постійною, такою, що дорівнює середньому значенню на даному інтервалі температур.

Для 1 кг пороху виходить, що чим більше $T_{гор}$, тим більше потенціал пороху $\frac{f}{\theta}$.

Гранична швидкість заряду – це швидкість снаряда, визначена за умови, що весь запас теплової енергії при пострілі перейде в кінематичну енергію снаряда.

Гранична швидкість снаряда відповідає використанню всього запасу енергії до кінця і ККД, що дорівнює 1. Однак, на практиці цієї величини не можна досягти, але вона входить множником для швидкості снаряда як у першому, так і в другому періоді, і зазвичай з її збільшенням зростає дійсна швидкість снаряда. Збільшення граничної швидкості залежить від запасу енергії пороху і від відносної ваги заряду щодо ваги снаряда. Вона зменшується зі збільшенням φ .

$$v_{np} = \sqrt{\frac{2f\omega}{\varphi\theta m}} = \sqrt{\frac{2gf\omega}{\varphi\theta q}}$$

$$v_{np} = 3000\text{--}5000 \text{ м/с.}$$

Термічний ККД – відношення всієї зовнішньої роботи, виробленої пороховими газами, до повного запасу енергії заряду цієї маси.

Для моменту вильоту снаряда з каналу ствола

$$\frac{\omega f}{\theta} \left(1 - \frac{T_{\partial}}{T_1}\right) = \frac{\varphi m v_{\partial}^2}{2}$$

або

$$\frac{\frac{\varphi m v_{\partial}^2}{2}}{\frac{\omega f}{\theta}} = \left(1 - \frac{T_{\partial}}{T_1}\right) = \frac{T_1 - T_{\partial}}{T_1}.$$

Відношення $\frac{T_1 - T_{\partial}}{T_1}$ – це термічний ККД циклу Карно.

Тоді $r'_{\partial} = \frac{\varphi m v_{\partial}^2 \theta}{2\omega f} = \frac{v_{\partial}^2}{\frac{2mf}{\varphi m \theta}} = \frac{v_{\partial}^2}{v_{np}^2}$ враховує всю сукупність

робіт, які здійснюють порохові газу в знарядді.

Коефіцієнт корисної дії зняряддя – це відношення корисної роботи, яку здійснюють порохові газу при пострілі, до їх можливої роботи.

$$r_{\theta} = \frac{\frac{mv_{\theta}^2}{\omega f}}{\theta} = \theta \frac{mv_{np}^2}{2\omega f}.$$

У звичайних знарядь $r_{\theta} = 0,25-0,3$. ККД знаряддя менше термічного ККД пострілу в φ раз:

$$r_{\theta} = \frac{r_{\theta}'}{\varphi}.$$

За цією величиною можна судити про артилерійське знаряддя як про досить досконалу теплову машину.

Коефіцієнт використання одиниці маси заряду застосовується для оцінювання балістичних якостей знаряддя. Виражається величиною дулової енергії снаряда, що приходиться на одиницю ваги заряду (кг·дм/кг). Залежить від відносної довжини знаряддя, товщини пороху і місця його згоряння. Із збільшенням початкової швидкості снаряда в потужних артилерійських системах збільшується відносна вага заряду і разом з тим збільшується відносна робота на переміщення самого заряду; внаслідок цього зменшується корисна відносна робота для таких знарядь, і величина коефіцієнта використання одиниці ваги заряду зменшується.

$$\eta_{\omega} = \frac{mv_{\theta}^2}{2\omega} \text{ – характеризує ефективність використання}$$

заряду.

Коефіцієнт заповнення площі індикаторної діаграми (коефіцієнт використання робочого об'єму каналу ствола) – це величина, що чисельно дорівнює відношенню площі під кривою тиску до площі прямокутника зі сторонами p_m і l_{θ} .

$$\eta_{\theta} = \frac{\int_0^{l_{\theta}} p dl}{p_m l_{\theta}}.$$

Отже, показує, яку частину складає дійсна робота від тієї роботи, яка б вийшла в ідеальному випадку, якщо б тиск за всією довжиною шляху l_{θ} був такий, що дорівнює

максимальному тиску p_m . На практиці держати прямокутну діаграму неможливо, оскільки процес на початку розганяється, а потім слабшає з природних причин і на це витрачається частина шляху.

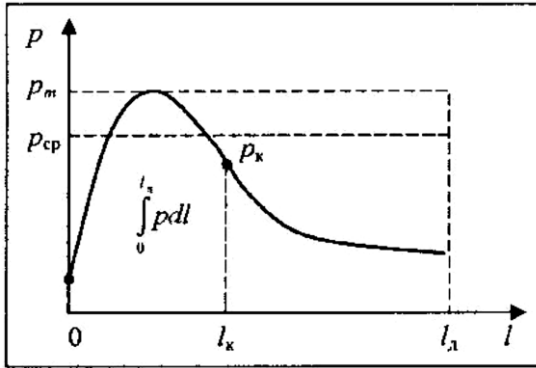


Рисунок 28 – Індикаторна діаграма зняряддя

Площа під кривою тиску еквівалентна площі прямокутника з тією самою основою l_0 і висотою, такою, що дорівнює деякому середньому тиску p_{cp} , при якому

$$\int_0^{l_0} p dl = p_{cp} l_0. \text{ Тоді одержимо}$$

$$\eta_0 = \frac{p_{cp}}{p_m}.$$

Величина p_{cp} визначається з рівняння руху $\varphi m V dV = p s dl$. Підставляючи в ліву частину рівняння середній тиск і інтегруючи в межах від 0 до V_0 і від 0 до l_0 одержимо вираз

$$p_{cp} = \frac{\varphi m V_0^2}{2s l_0},$$

де $s l_0 = W_0$ – об'єм каналу ствола.

Так як p_{cp} являє собою роботу порохових газів, віднесених до об'єму каналу ствола, то η_0 можна назвати коефіцієнтом використання робочого об'єму каналу ствола.

Величина η_o змінюється в межах 0,4–0,7. Якщо за інших рівних умов величина η_o одного заряддя більше, то вона має менше значення p_m і, отже, більш легкий ствол.

6.6. Вираз для коефіцієнта фіктивності маси снаряда

$1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 = \varphi$ – коефіцієнт обліку другорядних робіт. Або

$$\varphi = 1 + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 v_1 \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q} + \frac{q}{Q_0} \left(1 + \frac{\omega}{q}\right),$$

де r – радіус снаряда до середини виступів провідного паска;

α – місцевий кут нахилу надрізу;

v_1 – коефіцієнт тертя;

Q_0 – вага відкатних частин;

$\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha$ – відображає енергію на запрутки снаряда;

$\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 v_1 \operatorname{tg} \alpha$ – відображає витрати енергії на подолання

тертя в нарізах;

$\frac{1}{3} \frac{\omega}{q}$ – відображає витрати енергії на переміщення газо-

порохової суміші по каналу ствола;

$\frac{q}{Q_0} \left(1 + \frac{\omega}{q}\right)$ – відображає витрати енергії на віддачу

системи;

Коефіцієнт φ залежить від конструкційних характеристик системи «ствол-заряд-снаряд».

Коефіцієнти K_2, K_3, K_5 слабо залежать від відношення

$\frac{\omega}{q}$, тому їх об'єднують в єдиний коефіцієнт

$K = 1 + K_2 + K_3 + K_5$. Проф. В. О. Слухотський запропонував загальний вираз для φ :

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q},$$

вносячи в K суму всіх K_i крім K_4 , яке окремо виражено через $\frac{1}{3} \frac{\omega}{q}$. Значення K змінюється від типу зброї (для стрілецької зброї K дорівнює 1.1).

Тема 7. ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ВНУТРІШНЬОЇ БАЛІСТИКИ І МЕТОДИ ЇХ РІШЕННЯ.

План

- 7.1. Задачі внутрішньої балістики.
- 7.2. Методи розв'язання прямої задачі внутрішньої балістики.
- 7.3. Аналітичний метод рішення ОЗВБ.
 - 7.3.1. Фізична модель процесу пострілу.
 - 7.3.2. Математична модель процесу пострілу.
- 7.4. Чисельний метод рішення ОЗВБ.
 - 7.4.1. Метод Рунге-Кутта.

7.1. Задачі внутрішньої балістики

На підставі вивчення явища пострілів як шляхом аналізу окремих процесів, так і синтезом їх внутрішня балістика повинна встановити ті залежності, які мають місце при пострілі між численними та різноманітними умовами заряджання і залежними від них елементами пострілів, а потім на підставі встановленої залежності дати практичні вказівки для розрахунку дії порохових газів на снаряд, можливість керувати явищем пострілу.

Встановлення закономірностей, що дають можливість керувати явищем пострілу, складає *загальну задачу внутрішньої балістики*.

До *умов заряджання* відносять: розміри камори і каналу ствола, його вагу, устрій нарізки в каналі, вагу і устрій снаряда, тиск форсування, що залежить від устрою паска снаряда і нарізки каналу, ваги заряду, марки пороху, фізико-хімічних та

балістичних характеристик пороху, характеристик розширення газів.

Балістичними елементами пострілу ми будемо називати шлях снаряда l , швидкість снаряда v , тиск порохових газів p і їх температуру T , а також кількість газів $\omega\psi$, що утворилися до цього моменту.

При вирішенні вищезазначеної загальної задачі внутрішньої балістики можна виділити дві найважливіші основні задачі піродинаміки і ряд приватних задач.

Перша основна задача піродинаміки полягає у визначенні розрахунком зміни тиску газів і швидкості снаряда у каналі ствола у функції від шляху снаряда і від часу при заданих умовах заряджання. При цьому поряд з кривими $P(l)$, $P(t)$, $V(l)$, $V(t)$, визначаються дві найважливіші характеристики зброя – найбільший тиск газів p_m у каналі ствола і дульна швидкість снаряда v_0 , тобто швидкість снаряда при вильоті його з каналу ствола. Цю задачу можна назвати **прямою задачею піродинаміки**. При заданих умовах заряджання вона має єдине рішення – єдину криву тиску і максимум p_m , а також єдину криву швидкості снаряда і дульну швидкість v_0 .

Змінюючи умови заряджання, можна провести аналіз впливу умов на зміну кривих тиску газів і швидкості снаряда, тобто вирішити ряд приватних завдань, пов'язаних з розв'язанням прямої задачі.

Друга основна задача піродинаміки – задача балістичного проектування зброя – полягає у визначенні конструктивних даних каналу ствола і умов заряджання, при яких снаряд даного калібру і ваги одержує при вильоті певну початкову швидкість. Ця швидкість задається на основі тактико-технічних вимог, що ставляться до проєктованого зброя. При вирішенні її зазвичай задаються найбільшим тиском газів. У результаті вирішення цієї задачі даються конструктивні дані та умови заряджання, що забезпечують одержання заданої швидкості снаряда даного калібру і ваги. Потім для цих умов заряджання проводиться розрахунок кривих тиску газів і швидкості снаряда в функції від шляху і часу, тобто

розв'язується пряма задача внутрішньої балістики для обраного варіанта зняття і заряду.

Одержані криві використовуються конструкторами для розрахунку міцності стінок зняття і снаряда. Разом з цим даються необхідна товщина і форма пороху, який повинен бути виготовлений на заводі.

Вона допускає безліч рішень, безліч комбінацій конструктивних даних зняття і умов заряджання, при яких снаряд даного калібру і ваги одержує задану початкову швидкість.

7.2. Методи розв'язання прямої задачі внутрішньої балістики

У процесах, що відбуваються в природі або розглядаються в техніці, беруть участь, як правило, різні змінні величини, що мають певний фізичний зміст. При цьому чисельна зміна однієї або декількох величин супроводжується зміною інших змінних величин або сприяє цій зміні. Таким чином, завжди є відомий функціональний зв'язок між цими змінними величинами. Існує кілька способів вираження цього функціонального зв'язку.

Методи вирішення задач піродинаміки можна розділити на аналітичні, чисельні, емпіричні і табличні [1, 5, 7].

Поки теоретичні засади внутрішньої балістики не були достатньо повно і детально розроблені, переважне значення мали емпіричні методи. В їх основу було покладено використання відносно простих емпіричних формул, що спрощено виражають одержаний на досліді зв'язок елементів пострілу між собою. Поряд з формулами застосовувалися також і таблиці, які давали змогу швидко підрахувати елементи кривих тиску газів і швидкостей снаряда.

Емпіричні методи з'явилися в результаті обробки дослідних даних, одержаних при стрільбі в різних умовах, причому вхідні в них характеристики та константи визначалися з умов досліді.

Недолік цих методів (формул і таблиць) полягає в тому, що в них не враховується вплив деяких дуже важливих факторів

в умовах заряджання, причому їх можна застосовувати саме в тих умовах і в межах, при яких їх складали.

Число емпіричних формул і таблиць досить велике: до розробки аналітичних рішень вони мали виняткове значення завдяки своїй простоті. Але поява точних теоретичних рішень, що враховують з достатньою повнотою вплив більшості умов заряджання та особливостей процесів, що проходять при пострілі, дозволило вирішувати всі основні завдання піродинаміки на основі точних аналітичних залежностей. Внаслідок цього багато емпіричних формул і таблиць втратили своє значення і застосовуються тепер у деяких допоміжних випадках.

Аналітичні методи базуються на цілому ряді припущень, які характеризують умови горіння пороху і рух газів, снаряда і знаряддя, причому в основі цих припущень лежать здебільшого дослідні або теоретичні дані, які виражають фізичну сторону процесу пострілу.

Тому аналітичні методи розв'язання задач дають більш глибоке, ніж емпіричні, проникнення в дійсну природу явища і ближче відповідають суті процесів, що відбуваються при пострілі.

При аналітичному методі рішення задача зводиться до вирішення та інтегрування диференційних рівнянь різних видів.

Рішення можуть бути надані на основі геометричного і фізичного законів горіння пороху.

Поряд з аналітичними методами застосовують також чисельні методи інтегрування системи диференційних рівнянь звичайно або за допомогою кінцевих різниць, або розкладання в ряд Тейлора. До цих методів вдаються в особливо складних випадках, коли значення одного або декількох параметрів змінюється впродовж усього процесу пострілу і їх зміна не дає можливості розв'язувати задачу аналітично в кінцевому вигляді.

Інтегрування рівнянь внутрішньої балістики, що дають залежність між основними елементами при пострілі, приводить до досить складних інтегралів, що розв'язуються лише за допомогою квадратур із будь-яким ступенем точності. При цьому для можливості інтегрування в основних рівняннях, як

правило, деякі часові параметри беруть за постійні (θ , u_1 , p_0 і т. д.).

Метод чисельного інтегрування дозволяє вирішувати систему диференційних рівнянь, немає лише не спрощуючи вхідні в них функції, але навіть даючи змінні значення тим величинам, які, як правило, беруться постійними; при чисельному інтегруванні виходить можливість вирішення задач при будь-яких гіпотезах щодо характеру горіння пороху, закону опору руху, устрою каналу ствола і т. п.

Недоліком методу чисельного інтегрування є неможливість одержання поточних значень тиску, швидкості, шляху снаряда для будь-якого заданого моменту і необхідність послідовного переходу від одного значення аргументу до іншого, поповненням його кінцевих різниць. Тому, наприклад, не можна заздалегідь визначити величини максимального тиску або значення змінних швидкості, шляху й тиску, які відповідають кінцю горіння пороху, а доводиться послідовно точка за точкою обчислювати елементи кривих тиску, шляху снаряда, швидкості і т. д.

У результаті метод чисельного інтегрування дає залежність між окремими змінними лише у формі числових таблиць, а не аналітичних формул.

Незважаючи на ці недоліки, метод чисельного інтегрування може служити для непрямой перевірки ступеня точності, що дається тими чи іншими наближеними аналітичними методами.

Чисельне інтегрування з однаковим успіхом можна застосувати як у випадку геометричного, так і більш складного фізичного закону горіння.

Балістичні таблиці для розв'язання прямих задач піродинаміки за суттю справи є аналітичними формулами, переведеними до числа для ряду конкретних умов заряджання.

Однак балістичні таблиці дають можливість розв'язувати ряд таких задач, які не можна розв'язати безпосередньо за допомогою аналітичних формул.

У таблицях основні елементи пострілу пов'язані між собою безпосередньо: тиск, швидкість снаряда і час його руху

по каналу, дані у функції від шляху снаряда, що значно полегшує аналіз і дає можливість розробити спеціальну методику розв'язання задач, які можна розв'язати аналітичним методом.

7.3. Аналітичний метод рішення ОЗВБ

Має фізичну і математичну постановку.

7.3.1. Фізична модель процесу пострілу

Явище пострілу надзвичайно складне і недостатньо вивчені деякі фактори, що впливають на результати. Тому при теоретичному розв'язанні основного рівняння і виведення залежностей, що виражають зв'язок між фізико-хімічними і механічними явищами при пострілі, доводиться вдаватися до деяких спрощень і схем.

Основні припущення такі:

1. Горіння пороху підпорядковується геометричному закону горіння.
2. Порох горить при середньому тиску p .
3. Склад продуктів горіння не змінюється ні в часі горіння пороху, ні після його згоряння при адиабатичному розширенні газів (f і α постійні).
4. Швидкість горіння пороху пропорційна тиску: $u = u_1 p$.
5. Другорядні роботи, що враховуються, пропорційні головній роботі поступального руху снаряда і враховуються за допомогою коефіцієнта φ .
6. Рух снаряда починається, коли в камері в результаті згоряння частини заряду розвинеться тиск форсування p_0 достатній для врізання паска в нарізи на повну глибину; поступовість врізання і зростання опору паска не враховується.
7. Робота врізання паска окремо не враховується, так само як і збільшення швидкості снаряда при поступовому врізанні паска.

8. Розтягуванням стінок ствола при пострілі, проривом газів через зазори між ведучим паском і каналом ствола і опором повітря нехтують.
9. Охолодження газів у результаті тепловіддачі стінок стовбура безпосередньо не враховується і може бути взяте в розрахунок побічно (наприклад, зниженням сили $f = RT_1$ або збільшенням $\theta = \frac{1}{A + BT_{cp}}$).
10. Рух снаряда розглядається до моменту проходження дна його через дульний зріз.
11. Величину $\theta = \frac{C_p}{C_w} - 1$ беруть такою, що дорівнює

середньому значенню, постійному для всього періоду пострілу.

Наявність перерахованих допущень, що свідомо схематизують процес пострілу і ухиляються в тій чи іншій мірі від дійсності, веде до того, що залежності, які будуть одержані при рішенні, висловлять фізико-механічну сутність явища пострілу лише з деяким наближенням достатнім для прогнозування пострілу.

7.3.2. Математична модель процесу пострілу

В явищі пострілу яскраво проявляється взаємозв'язок і взаємозалежність одних елементів і факторів від інших. Наприклад, швидкість руху снаряда у каналі ствола залежить від величини тиску порохових газів, а саме тиск залежить як від інтенсивності горіння пороху, так і від об'єму заснарядного простору, зміна якого, в свою чергу, залежить від швидкості снаряда. При вивченні пострілу всі ці фактори розглядаються у взаємозв'язку.

В основне рівняння піродинаміки входить велике число постійних величин – характеристик гармати, снаряда, заряду і пороху, які визначають умови заряджання, і чотири змінні величини p , v , l , φ , називають *елементами пострілу*.

Для встановлення зв'язку між елементами пострілу до основного рівняння додається рівняння горіння пороху і руху

снаряда, причому з'являється змінна величина – час t , а при геометричному законі горіння – величина z .

У результаті одержимо таку систему рівнянь:

– основне рівняння піродинаміки:

$$ps(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi m v^2;$$

– закон швидкості горіння пороху:

$$u = \frac{de}{dt} u_1 p;$$

– рівняння горіння пороху:

$$\psi = \kappa z(1 + \lambda z) = \kappa z + \kappa \lambda z^2,$$

$$\sigma = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda}{\kappa} \psi};$$

– закон руху снаряда:

$$ps = \varphi m \frac{dv}{dt}$$

або

$$ps = \varphi m v \frac{dv}{dl}.$$

Сукупність цих рівнянь дозволяє розв'язати основну математичну задачу: знайти криві $P(l)$ і $V(l)$, а також $P(t)$ і $V(t)$, зокрема, знайти найбільший тиск газів p_m і дульну швидкість снаряда v_0 .

Ця модель характеризується як задача, поставлена в нульвимірній постановці (тобто просторові координати не контролюються). Задача, в якій єдиною незалежною змінною є час, називається нестационарною. Одне диференціальне рівняння і чотири рівняння зв'язку у вигляді алгебраїчних співвідношень: $t = 0$; $v = 0$; $\psi = \psi_0$; $z = z_0$.

Задача містить як параметри такі величини: s , l_ψ , ω , f , θ , κ , λ , u . Таким чином, змінюючи умови параметрів задачі, можна впливати на результат: $p = p_0$, $l = l_0$.

Н. Ф. Дроздов при розв'язанні задачі щодо першого періоду, як незалежну змінну взяв величину $x = z - z_0$, другого періоду як незалежна змінна використовувалася величина l .

Необхідно зазначити, що у наш час аналітичний шлях вирішення ОЗВБ не актуальний, оскільки він сполучений, по-перше, із значною кількістю припущень, що зменшує точність одержаних рішень, по-друге, зі складністю одержаних рівнянь для окремих залежних величин незручно для проведення інженерних розрахунків, по-третє, з тим, що він прив'язаний виключно до порохів, що горять за геометричним законом. У зв'язку з цим у наш час найкращим шляхом вирішення ОЗВБ є розв'язання задачі чисельними методами.

7.4. Чисельний метод рішення ОЗВБ

Задаються значення:

$$\omega_{ij}, f_{ij}, \alpha_{ij}, \theta_{ij}, T_{ij}, \delta_{ij}, I_{ij}, z_{kij}, \kappa_{1ij}, \lambda_{1ij}, \kappa_{2ij}, \lambda_{2ij}, C_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij},$$

де $0 \leq j < n$,

n – кількість порохів;

$i=1,2$ – номер пороху за ознакою закону швидкості горіння.

Крім того, дано: $d, q, s, W_0, l_d, \varphi, \varphi_1, p_0$.

Потрібно визначити $P(l), V(l), P(t), V(t)$, зокрема, знайти найбільший тиск газів p_m і дульну швидкість снаряда v_d .

Виходячи з того, що

$$\psi = \frac{\omega_\psi}{\omega},$$

$$\omega_\psi = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^n \omega_{ij} \psi i_j,$$

$$L_{np} = \frac{1}{\omega_\psi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^n L_{ij} \omega_{ij} \psi i_j,$$

$$\theta_{np} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^n \frac{f_{ij} \omega_{ij} \nu_{ij}}{T_{1ij}}}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^n \frac{f_{ij} \omega_{ij} \nu_{ij}}{T_{1ij} \theta_{ij}}}.$$

7.4.1. Метод Рунге-Кутта

Система рівнянь, подібна поданої вище, як правило, вирішується з використанням методу Рунге-Кутта. Досить точний метод може застосовуватися не лише до одного диференційного рівняння, але і системи. Суть методу полягає у тому, щоб при інтегруванні рівняння $y' = f(x, y)$ одержати вираз для y_{n+1} , що збігається з розкладанням $f(x, y)$ у ступеневий ряд за h до членів певного порядку щодо h , але які не містять похідних від $f(x, y)$ як при інтегруванні за допомогою ряду Тейлора.

Замість розкладання користуються формулою

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

$$\text{де } k_1 = hf(x_n, y_n),$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right),$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right),$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3),$$

$$K = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).$$

Інтегрування зводиться до послідовного обчислення коефіцієнтів k_1, k_2, k_3, k_4, K_4 до обчислення наступного значення функції за формулою

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).$$

Після цього процес повториться для нових значень $x_{n+1} = x_n + h, y_{n+1} = y_n + k$.

Кількість циклів залежить від величини інтервалу зміни аргумента і від величини кроку інтегрування. Оцінювання величини кроку інтегрування проводять виходячи із співвідношення $\frac{k_2 - k_3}{k_1 - k_2}$. Якщо воно менше 0,05, то крок інтегрування можна визнати задовільним. В іншому випадку величину кроку інтегрування необхідно зменшити, щоб не знизити істотно точність обчислень.

Тема 8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА БАЛІСТИКА. МЕТОДИ БАЛІСТИЧНИХ ВИМІРІВ

План

- 8.1. Значення експериментальних досліджень у балістиці.
- 8.2. Зміст експериментальної балістики.
- 8.3. Вимір тиску порохових газів.
 - 8.3.1. Метод пластичних деформацій.
 - 8.3.2. Методика застосування крешерів для вимірювання тиску.
 - 8.3.3. П'єзоелектричний метод.
 - 8.3.4. Тензометричний метод.
 - 8.3.4.1. Електрична схема тензоіндикатора.
 - 8.3.4.2. Конструкція тензоманометрів.
 - 8.3.4.3. Реєструюча апаратура.
- 8.4. Вимір швидкості снаряда.
 - 8.4.1. Рам-мішений метод.
 - 8.4.2. Соленоїдне блокування.
 - 8.4.3. Індукційні вимірювачі швидкості.
 - 8.4.4. Фотоелектронне блокування.
 - 8.4.5. Оптичні вимірювачі швидкості.
 - 8.4.6. Доплерівські локатори вимірювання швидкості снарядів.
 - 8.4.7. Високошвидкісна кінозйомка.

8.1. Значення експериментальних досліджень у балістиці

Основними елементами будь-яких експериментальних досліджень є, по-перше, вимірювання фізичних величин, що

характеризують досліджувані процеси, і, по-друге, обробка результатів, одержуваних при вимірах.

Предмет експериментальної балістики – вивчення методів вимірювань, організації і проведення дослідів і прийомів обробки результатів вимірювань, що застосовуються при експериментальних дослідженнях явища пострілу і балістичних властивостей артилерійських гармат, набоїв і снарядів.

Не аналізуючи детально явище пострілу, можна виділити в ньому такі основні процеси:

- 1) горіння пороху, тобто перетворення твердої речовини – пороху в газу з виділенням великої кількості тепла;
- 2) перетворення теплової енергії порохових газів у механічну та інші види енергії;
- 3) рух снаряда у каналі ствола під дією тиску порохових газів і різного роду сил опору;
- 4) рух снаряда в повітрі під дією сили ваги снаряда і сили опору повітря.

Дослідне вивчення цих процесів ґрунтується на вимірюванні різноманітних балістичних величин. За допомогою останніх проводиться аналіз явища пострілу, визначається вплив різних факторів на характер його розвитку і встановлюються кількісні співвідношення між окремими характеристиками пострілу у вигляді залежностей і формул. Останні являють собою математичне вираження закономірностей, яким підпорядковані окремі пов'язані з пострілом процеси.

Особливе значення при експериментальних дослідженнях мають вимірювання величин тиску порохових газів і швидкості снаряда, також визначення характеру їх зміни в часі. Вимірювання тиску порохових газів і швидкості снаряда служать самим широким засобом для різнобічного вивчення багатьох процесів явища пострілу. Тому ці виміри є основними видами вимірювань, що застосовуються в експериментальній балістиці.

Тиск порохових газів виражає силу, яка рухає снаряд у каналі ствола. Дослідні криві тиску в функції часу або шляху снаряда дають можливість дослідити дію пороху в знарядді,

визначити шлях, швидкість і прискорення снаряда у каналі ствола і зв'язати елементи руху снаряда з умовами заряджання знаряддя. Криві тиску застосовуються при розрахунку міцності ствола, дії пострілу на лафет і дії механізмів детонаторів. За допомогою кривих тиску, що одержуються при спалюванні пороху в постійному об'ємі у так званих манометричних бомбах, проводиться балістичний аналіз порохів, тобто визначаються їх властивості та характеристики процесу горіння пороху і утворення порохових газів.

Таке саме велике значення мають вимірювання швидкості снаряда на різних ділянках його шляху. Знання величин швидкості снаряда в будь-які моменти руху дозволяє зробити аналіз сил, що діють на снаряд, визначити сили опору повітря снаряду, що летить, і оцінити балістичні якості снаряда. Особливо важливо визначення початкової швидкості снаряда, під якою умовно розуміють швидкість снаряда в момент вильоту з каналу ствола. Початкова швидкість при інших рівних умовах є мірою корисної дії порохового заряду в знарядді і служить характеристикою стану артилерійських знарядь щодо стабільності властивостей порохових зарядів і зносу каналу ствола. Знання початкової швидкості необхідно також для розрахунку траєкторії снаряда і для складання таблиць стрільби.

8.2. Зміст експериментальної балістики

Зміст експериментальної балістики становить в основному розроблення таких питань:

- 1) експериментальне дослідження роботи порохових газів при пострілі та вимірювання параметрів його стану: тиску, щільності і температури;
- 2) вимірювання переміщень, швидкостей і прискорень снаряда, відкатних частин і газових потоків;
- 3) вимірювання часу в балістичних процесах;
- 4) експериментальне вивчення процесів, пов'язаних з рухом снаряда, і методів визначення сил та моментів, діючих на снаряд у різні періоди пострілу;
- 5) експериментальне дослідження роботи різних елементів артилерійських гармат та боєприпасів при пострілі

- (дослідження дульних гальм, газовідвідних пристроїв, сопів, елементів автоматики, провідних пристроїв снарядів та мін і т. д.);
- б) експериментальне визначення балістичних характеристик порохів, зарядів, снарядів (куль, мін) і знарядь;
 - в) організація і проведення лабораторних та полігонних випробувань та методика обробки результатів вимірювань.

На основі цього внутрішня та зовнішня балістика створюють методи розв'язання практичних задач, пов'язаних із проектуванням, виготовленням та бойовим застосуванням об'єктів артилерійського озброєння.

Великий внесок у балістику був зроблений талановитим вченим-винахідником, творцем бойових ракет, генералом К. В. Константиновим. Він уперше застосував електрику і магнетизм для цілей вимірювання швидкості снарядів і для реєстрації в часі швидкодіючих балістичних процесів.

Перші праці, що систематично викладають питання експериментальної балістики, були видані в Артилерійській академії. Так, у 1885–1891 рр., професором академії С. А. Пашкевичем був написаний курс внутрішньої балістики, в якому друга частина була присвячена опису приладів і методів експериментальних досліджень.

8.3. Вимір тиску порохових газів

Тиск, температура, питомий об'єм є основними параметрами, що визначають стан і внутрішню енергію порохових газів при пострілі та характеризують роботу порохового заряду в знарядді.

Досвід показує, що з трьох параметрів стану порохових газів порівняно легко можна виміряти лише тиск. Інші параметри стану порохових газів, а також ряд параметрів більшості процесів пострілу, не піддаються безпосередньому вимірюванню, доводиться визначати непрямим шляхом, у першу чергу, за результатами вимірювання тиску порохових газів.

Вимірювання тиску порохових газів і визначення характеру його зміни в часі має велике значення для вивчення горіння пороху. За дослідними кривими тиску проводиться балістичний аналіз порохів, тобто визначаються балістичні характеристики кожного пороху: сила пороху, коволюм, повний імпульс тиску порохових газів і коефіцієнт швидкості горіння пороху. На підставі кривих тиску у функції часу встановлюється закон горіння пороху, виявляється вплив різних факторів на горіння пороху і дається якісна і кількісна оцінка впливу цих факторів при пострілі.

Результати вимірювання тиску в знаряддях дозволяють визначати вплив окремих умов заряджання знаряддя на характер дії порохових газів у каналі ствола, у дульних гальмах і газовідвідних пристроях. Ці самі результати дають можливість встановити ступінь наближення ряду теоретичних рішень балістики до дійсних даних, що одержані на досліді.

Велике практичне значення має вимір величини найбільшого тиску порохових газів у каналі ствола. За результатами вимірювань найбільшого тиску судять про міцність стовбурів, лафетів, про правильність дії механізмів знаряддя і детонаторів. При полігонних дослідженнях величини найбільшого тиску служать підставою для правильного підбору та устрою зарядів до знарядь. Нарешті, найбільший тиск порохових газів є одним із основних критеріїв при оцінюванні балістичних властивостей артилерійських систем, порохових зарядів і снарядів при контрольних та приймальних випробуваннях їх на полігонах і заводах.

Тиск – це сила, віднесена до одиниці площі поверхні, на яку діють порохові гази. Тому вимірювання тиску ґрунтується на тих принципах, що і вимірювання сил. Згідно уявлень механіки одна і та сама сила може проявити себе двояко: статично, коли вона діє на нерухоме тіло і викликає з боку цього тіла рівну собі силу протидії, і динамічно, коли вона виводить тіло зі стану спокою або змінює його рух.

Мірою сили в статичному прояві є деформації, що виникають у тілі і зумовлюють появу з боку тіла сили протидії.

Мірою сили в динамічному прояві є прискорення, які повідомляються тілу цією силою.

Статичні методи вимірювання тиску ґрунтуються на принципі перетворення величин тиску у величини деформації або інші пов'язані з нею фізичні величини.

Динамічні методи вимірювання тиску ґрунтуються на принципі перетворення величин тиску в кінематичні елементи руху: прискорення, швидкість або шлях у функції часу.

Статичні та динамічні методи вимірювання тиску поділяються на механічні та електричні.

Статичні методи становлять найбільш розвинену й численну групу методів вимірювання тиску. Але в експериментальній балістиці одержали широке поширення лише деякі з них. Цими методами є: метод пластичних деформацій, метод пружних деформацій, п'єзоелектричний, тензометричний і деякі інші. Перші два методи відносяться до механічних, а решта – до електричних методів.

8.3.1. Метод пластичних деформацій

Заснований на використанні як міра тиску деформацій, що виникають у пластичних тілах під дією тиску. В артилерійській практиці широко використовується крешерний метод. Крешерний метод заснований на визначенні величини тиску за величиною залишкової деформації мідного циліндричного або циліндро-конічного стовпчика – крешера, яку він одержує під впливом вимірюваного тиску. Для передачі тиску порохових газів на крешер останній поміщають у крешерний прилад, принципова схема якого наведена на рис. 29.

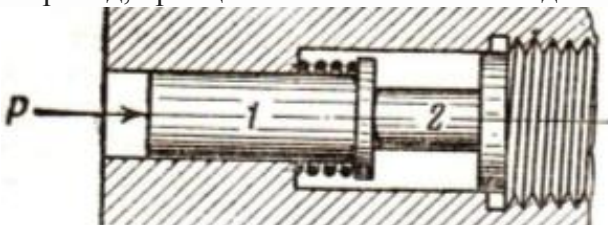


Рисунок 29 – Принципова схема крешерного приладу

Тиск p порохових газів через поршень 1 передається на крешер 2, затиснутий між головкою поршня і нерухомою упорною пробкою 3. Під дією сили sp (s – площа поперечного перерізу поршня) крешер деформується в осьовому і поперечному напрямках, як це показано на рис. 30.

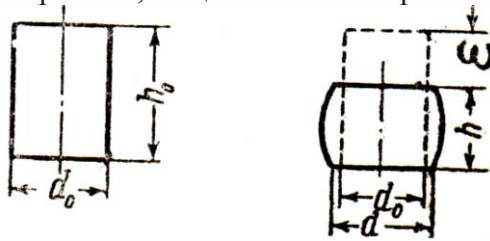


Рисунок 30 – Вид крешера до і після обтиснення

Про величину тиску, що діяла на крешер, судять за величиною осьової залишкової деформації $\epsilon = h_0 - h$, а деформацію крешера в поперечному напрямку безпосередньо не враховують. На рисунку через h_0 позначена початкова висота крешера, через h – залишкова висота крешера. Для переходу від деформації до тиску, як правило, користуються так званою таражною таблицею, яка являє собою виражену у числах залежність між величинами деформації крешера і навантаженнями або тисками, що одержується, як правило, шляхом статичного тарування крешерів. Таражна таблиця або крива ϵ , по суті, характеристикою опору деформації крешерного стовпчика.

Для вимірювання максимальних тисків порохових газів у межах 50–400 МПа застосовуються циліндричні крешери таких розмірів: 15x10; 13x8; 9,8x6; 8,1x5; 6,5x4; 4,9x3, де перше число означає висоту крешера в мм, а друге – діаметр крешера в мм. Різноманітність у розмірах крешерів пояснюється тим, що кожен розмір крешера дає найбільш надійні результати в межах середньої ділянки своєї таражної характеристики, близької до прямої лінії. Тому залежно від величини вимірюваного тиску та перерізу і ваги поршня крешерного приладу необхідно застосовувати крешерні стовпчики відповідних розмірів.

Циліндричний крешер зручний при визначенні найбільшого тиску, але не характеру його наростання. Для лабораторного дослідження горіння порошу застосування циліндричного крешера обмежується через істотний недолік: він не дає повної кривої наростання тиску, так як починає стискуватися з тисків від 200 до 400 кг/см² залежно від якості металу цієї партії крешерів.

Для вимірювання максимальних тисків порохових газів при пострілі в межах 50–150 МПа (наприклад, у мінометах), а також при балістичному аналізі порохів за допомогою дослідів у манометричній бомбі, коли необхідно одержати повний запис кривої наростання тиску, застосовуються конічні крешери.

Конічний крешер (рис. 31) був розроблений і введений в практику в 1923–24 рр. проф. М. Е. Серебряковим. Маючи малий опір при малих тисках, конічний крешер починає деформуватися з зусилля в 5–7 кг; по мірі збільшення стиснення опір його зростає, наближаючись до опору циліндричного крешера.

Конічна частина крешера закінчується не вістрям, а має невелику площадку для того, щоб не стискатися при дуже слабких зусиллях.

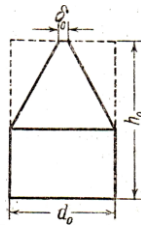


Рисунок 31 – Конічний крешер

Останнім часом за кордоном і в Росії все ширше застосовуються сферичні крешери, що мають ряд переваг. Сферичні крешери одного типорозміру мають дуже широкий діапазон вимірюваних тисків від 20 до 1000 МПа, допускають як статичне, так і динамічне тарування, мають високу лінійність таражної залежності, більш технологічні у виготовленні.

Численні експерименти показали, що найбільш раціональним є крешер діаметром 6 мм.

Одна з основних вимог до крешерів полягає в одноманітності механічних властивостей всіх крешерів цієї партії. Тому крешери виготовляються з хімічно чистої електролітичної міді.

Із конструктивним виконанням крешерні прилади бувають вгвинченими і вкладними. Для вимірювання тиску вгвинчений крешерний прилад укручується в отвір, просвердлений у каналі ствола гармати, а вкладний поміщається перед спорядженням пострілу на дно гільзи.

Вкладні крешерні прилади застосовуються для вимірювання найбільшого тиску в гарматах і мінометах різних калібрів, що мають досить великий об'єм камори порівняно з об'ємом крешерного приладу.

Вгвинчені крешерні прилади застосовуються для визначення тиску порохових газів у стрілецькій зброї, знаряддях малого калібру (як правило, менше 37 мм калібру), в мінометах до 120 мм калібру включно і в спеціальних знаряддях, призначених для дослідницьких цілей.

Для визначення тиску порохових газів у гвинтівці залежно від шляху кулі по каналу ствола в різних перетинах каналу ствола можуть бути встановлені декілька крешерних приладів.

Для вимірювання максимального тиску в знаряддях малого калібру або тиску порохових газів у різних перетинах гарматного стовбура застосовуються так звані бічні крешерні прилади, що являють собою різновид вгвинчених крешерних приладів.

Іноді в знаряддях із картузним зарядженням, а також із дослідницькими цілями в інших знаряддях застосовуються вгвинчені затворні крешерні прилади.

Перехід від деформації крешерного стовпчика до тиску здійснюється за допомогою спеціальних таражних таблиць, складених за результатами обтиснення крешерних стовпчиків при різних навантаженнях, які створюються важільним пресом. Принципово для тарування крешерів придатний прес будь-якої

конструкції, на якому може бути встановлений вантаж із певною точністю і в певних межах. Однак для одержання порівняльних результатів крешери повсюдно повинні таруватися на пресі певної конструкції. Таким штатним пресом є важільний прес Барановського (він же прес Випробувальної комісії Охтенського порохового заводу). Цей прес застосовується для попереднього стискання крешерів перед дослідом.

8.3.2. Методика застосування крешерів для вимірювання тиску

При таруванні крешерів обтисненням на пресі тиск може визначатися:

- 1) безпосередньо за таражною таблицею;
- 2) за таражною таблицею з одним попереднім обтисненням крешера;
- 3) за двома попередніми обтисненнями крешера.

При визначенні тиску безпосередньо за таражною таблицею беруть крешер певного розміру залежно від величини найбільшого тиску і перерізу поршня крешерного приладу і вимірюють його початкову висоту h_0 . Крешер поміщають у крешерний прилад, який в остаточно спорядженому вигляді вкладають (угвинчують) у місце вимірювання тиску, і роблять постріл. Після пострілу крешер виймають із приладу, вимірюють його висоту, що залишилася, h і знаходять величину обтиснення крешера як різницю між початковою і залишковою висотами:

$$\varepsilon = h_0 - h.$$

За величиною обтиснення крешера входять в таражну таблицю для цієї партії крешерів і знаходять тиск p , МПа.

Відмінність способу одного попереднього стиснення крешера, запропонованого у 1869 р. відомим російським артилеристом А. В. Гадолиним, від попереднього способу полягає в тому, що для визначення тиску беруться крешери, попередньо обтиснуті на пресі відомим вантажем. Попереднє обтиснення крешерів проводиться для того, щоб зменшити помилки при вимірюванні тиску, за допомогою обліку механічних якостей окремих крешерів однієї і тієї самої партії і

зменшення впливу різниці в умовах прикладання навантаження при таруванні і при пострілі. Величина навантаження для попереднього обтиснення вибирається з таким розрахунком, щоб відповідний їй тиск був на 10–20 МПа менше очікуваного при досліді для тисків менш 100 МПа і на 20–40 МПа менше очікуваного при вимірюванні тиску понад 100 МПа. Виходячи з очікуваного тиску і перерізу поршня крешерного приладу, вибирають розмір крешера. Далі, керуючись зазначеними вище рекомендаціями, призначають величину тиску попереднього обтиснення p_1 МПа. Враховуючи площу поршня крешерного приладу, обжимають крешери на пресі навантаженням $Q = sp_1$, яке відповідає тиску попереднього обтиснення p_1 . Після обтиснення на пресі вимірюють висоту h_1 кожного крешера (висота попереднього обтиснення) і, увійшовши за нею (або за $\varepsilon = h_0 - h_1$) у таражну таблицю для цієї партії крешерів, знаходять відповідні табличні величини тисків p_T . Ці значення тиску p_T окремих крешерів можуть збігтися з тиском попереднього обтиснення p_1 але, як правило, вони будуть відрізнятись від останніх, внаслідок індивідуальних механічних властивостей цього крешера. Різниця $\Delta p = p_1 - p_T$ є поправкою, що характеризує ступінь відмінності механічних властивостей даного крешера від середніх властивостей партії, що виражаються таражною таблицею. Попередньо обтиснений крешер вставляють у крешерний прилад, останній вкладають (або угвинчують) у зброю і роблять постріл. Після пострілу витягують крешер, обмірюють його висоту h і за цією висотою за тією самою таражною таблицею визначають тиск p_2 . До цього тиску додають поправку Δp МПа з її знаком.

Отже, остаточно виміряний тиск буде дорівнювати $p = p_2 + \Delta p$.

Практикою встановлено, що попередньо обтиснуті крешери дають на 5–6 % більший тиск, ніж необтиснені. Спосіб двох попередніх стиснень крешерів дає можливість при вимірюванні тиску обійтися без таражної таблиці. Сутність її

полягає в тому, що крешер перед дослідом обжимають на пресі двома послідовними навантаженнями, відповідними двом тисків p_1 і p_2 , що відрізняються один від одного на 10–20 МПа. При цьому більший тиск попереднього обтиснення повинен бути менше очікуваного при стрільбі на 10–20 МПа при вимірюванні тиску менше 100 МПа і на 20–40 МПа для тиску понад 100 МПа. Кожному тиску попереднього обтиснення будуть відповідати певні висоти крешера h_1 і h_2 . Вважаючи, що крешер працює в межах лінійної ділянки характеристики опору, тобто, що величина обтиснення крешера прямо пропорційна навантаженню, можна написати

$$\frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2} = \frac{p - p_2}{h_2 - h},$$

де p – вимірюваний тиск;

h – відповідна йому висота крешера.

Тоді

$$p = p_2 + (h_2 - h) \frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2} = p_2 + k(h_2 - h),$$

де $k = \frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2}$ – характеризує приріст тиску, який

припадає на 0,01 мм стиснення крешера.

8.3.3. П'єзоелектричний метод

Крешерні прилади дозволяють визначати лише величину максимального тиску, але не можуть реєструвати зміну тиску в часі. Визначити зміну тиску в часі дозволяють електричні методи, засновані на використанні датчиків (перетворювачів), які під впливом тиску виробляють електричний сигнал або змінюють свої електричні характеристики. До першого типу відносяться п'єзоелектричні та індукційні датчики, до другого – емнісні, індуктивні і тензометричні.

Датчики, що використовуються у внутрішньобалістичних дослідженнях, повинні володіти високою чутливістю, високою власною частотою коливань, стабільністю характеристик, малими габаритами і малою чутливістю до температурних

впливів. Найбільш повно відповідають зазначеним вимогам п'єзо - і тензодатчики.

П'єзоелектричний метод ґрунтується на використанні як міри тиску електричних зарядів, що виникають на поверхні деяких кристалічних речовин, які поляризуються при деформуванні в певному напрямку.

П'єзоелектричними властивостями володіють кристали кварцу, турмаліну, сегнетової солі і деяких інших речовин. Здатність перерахованих кристалів електризуватися при пружній деформації називається **прямим п'єзоелектричним ефектом**. Названі кристали мають також властивість змінювати свої геометричні розміри при дії на них електричного поля. Це явище називається **зворотним п'єзоелектричним ефектом**.

У техніці вимірювання тисків найбільше застосування одержав кварц завдяки своїй широкій поширеності у природі та позитивним якостям, насамперед – високій механічній міцності і стабільності п'єзоелектричних властивостей. Турмалін має майже такі самі п'єзоелектричні і механічні властивості як і кварц, однак вартість його значно вища і він важче піддається механічній обробці. Сегнетова сіль володіє найбільшим п'єзо ефектом, приблизно у 150 разів більшим, ніж у кварца. Але п'єзоелектричні властивості сегнетової солі дуже залежать від температури і вологості. Крім того, кристали сегнетової солі мають досить малу механічну міцність. Із цих причин турмалін і сегнетова сіль не застосовуються для вимірювання тисків у балістичних дослідженнях.

Кварц – природна хімічна сполука кремнію й кисню – SiO_2 . Природні кристали кварцу мають форму шестигранної призми, що переходить у основах у піраміди. В кристалах кварцу розрізняють такі осі: електричні – x_1, x_2, x_3 , нейтральні – u_1, u_2, u_3 і оптичну вісь z . У напрямку цих осей кристал кварцу володіє різними фізичними властивостями і неоднакову здатність електризуватися при деформації. Електричні заряди виникають на поверхні кварцового елемента лише при його деформації в напрямку електричної або нейтральної осі. Явище електризації кварцу при деформації в напрямку електричної осі

називається *поздовжнім п'єзоэффектом*, а в напрямку нейтральної осі – *поперечним п'єзоэффектом*.

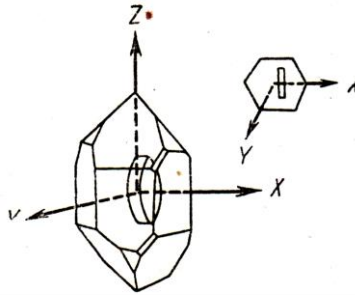


Рисунок 32 – Схематичне зображення кварцу

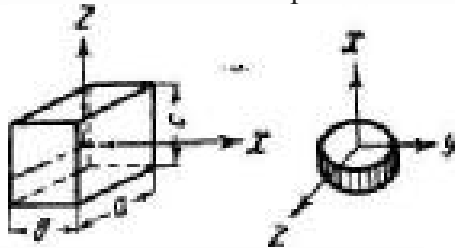


Рисунок 33 – Вигляд пластинок кварцу

При використанні п'єзоелектричних властивостей кварцу для технічних цілей з його кристалів вирізаються пластинки (рис. 33) у формі паралелепіпеда з гранями, паралельними осям хуз, або у формі круглих пластинок з віссю обертання, яка паралельна електричній осі кварцу. Такі пластинки називаються *кварцовими п'єзоелементами*, а їх грані, на яких виділяються електричні заряди, – *активними гранями*. Комплекс або набір п'єзоелементів, що застосовується у манометрах для вимірювання сил і тисків, часто називають *п'єзодатчиками*.

П'єзоелектричні властивості кварцових п'єзоелементів полягають у такому:

- 1) при стисненні кварцової пластинки в напрямку електричної осі на гранях, перпендикулярних до осі, порушуються рівні і протилежні за знаком електричні заряди. Кількість електрики, q_i , що виділяється кожною активною гранню, прямо пропорційна стискаючій силі

F_x і в розглянутому випадку прикладання навантаження не залежить від розмірів кварцової пластинки:

$$q_x = KF_x; \quad (8.1)$$

- 2) при стисненні кварцової пластинки в напрямку нейтральної осі електричні заряди виникають також на гранях, перпендикулярних до електричної осі. У цьому випадку кількість електрики q_t , що виділяється на кожній активній грані, пропорційна діючій силі F_y і залежить від відношення розміру пластинки в напрямку нейтральної осі a до розміру в напрямку електричної осі b :

$$q_y = KF_y \frac{a}{b}. \quad (8.2)$$

Із зіставлення формул (8.1) і (8.2) при одному і тому самому значенні деформуючої сили $F = F_x = F_y$ одержимо

$$q_y = \frac{a}{b} q_x, \quad (8.3)$$

тобто при використанні поперечного п'єзоефекту можна одержати відносно великі електричні заряди, ніж при поздовжньому п'єзоефекті, внаслідок відповідного вибору розмірів a і b п'єзоелемента;

- 3) при деформації кварцової пластинки в напрямку оптичної осі, а також при всебічному рівномірному стисненні її збудження електричних зарядів не відбувається;
- 4) при зміні деформації стиснення на розтяг електричні заряди на активних гранях також змінюють свої знаки.

У наведених формулах коефіцієнт пропорційності K має однакове значення і називається **п'єзоелектричною постійною кварцу**. П'єзоелектрична постійна кварцу виражає кількість електрики, що виділяється кожною активною гранню кварцової пластинки при стиску або розтягу її одиночною силою в напрямку головної електричної осі.

Кварцовий п'єзоелемент працює практично безінерційно, тобто не має місця відставання пружних деформацій від сили, що викликає їх. Це означає, що електричні заряди при деформації кварцової пластинки змінюються одночасно і з

такою ж швидкістю, з якою змінюється навантаження на кварц. Поряд із цим кварц не має гістерезису, тобто залежність між величиною заряду і деформуючою силою залишається однаковою як при зростанні, так і при зниженні навантаження. Заряд виникає і зникає одночасно з прикладанням та зняттям навантаження на п'єзоелемент. Кварц є гарним ізолятором.

На рис. 34 зображена схема кварцового датчика тиску. У корпус датчика 4 поміщається поршень 1, який впливає через упор 2 і проміжну пластину 3 на пластини кварцу 9, розміщені між гвинтом 7 і проміжною пластиною. Напруга знімається з обкладинок пластини 8 за допомогою електрода 6, проходить через ізолятор 5.

Експериментально встановлено, що сучасні конструкції п'єзоіндикаторів при правильному їх використанні і нормальному режимі роботи володіють загальною похибкою в 1–1,5 %. З урахуванням похибок, що допускаються при таруванні і при обробленні осцилограм, помилка у визначенні тисків п'єзоелектричним методом визначається в 2–2,5 %.

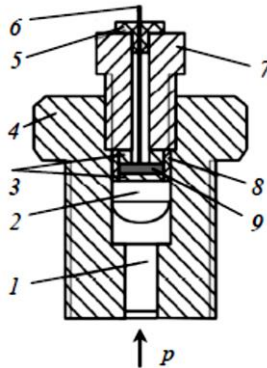


Рисунок 34 – Схема п'єзодатчика тиску

Значним недоліком п'єзоелектричного методу є велика чутливість його ланцюга, що несе електростатичний заряд, до змін метеорологічних умов. Це не дає можливості застосовувати п'єзоіндикатори в умовах полігону.

8.3.4. Тензометричний метод

Тензометричний метод вимірювання тиску ґрунтується на властивості деяких провідників і напівпровідників змінювати при деформації свій омичний опір електричному струму.

Схематично метод вимірювань полягає у такому. Провідник або напівпровідник, що використовується для виміру тиску і названий омичним датчиком, включається в спеціальний електричний ланцюг, в якому встановлюється цілком певний режим, що відповідає початковому опору датчика. При дії тиску датчик одержує деформації, внаслідок яких відбувається зміна його опору, і відповідно до цього відбувається зміна параметрів електричного ланцюга: напруги і сили струму. Зміна однієї з цих величин реєструється за допомогою шлейфового або катодного осцилографа. У результаті виходить крива, яка зображує в деякому масштабі тиск, що діє на омичний датчик, у функції часу. За допомогою таражної залежності, що являє собою зв'язок між показаннями вимірювальної схеми і відомими навантаженнями на датчик, одержана крива перетворюється в криву дійсних значень змінного тиску в досліджуваному об'єкті.

Омичні датчики залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені, поділяються на провідникові і напівпровідникові.

Провідниковими називаються датчики, виготовлені з металевого дроту з відносно високим питомим опором. Як матеріали для дроту використовують переважно сплави: константан, манганін, елінвар, ніхром та ін.

Датчик являє собою відрізок дроту, наклеєного на смужку тонкого паперу завтовшки 10–25 мкм у вигляді декількох частих плоских петель довжиною від 5 до 25 мм. Довжина петлі називається *базою датчика*. Діаметр дроту залежно від призначення датчика вибирається від 20 до 50 мкм. Довжина дроту встановлюється з розрахунку, щоб початковий опір датчика становив 100–250 Ом при роботі зі шлейфовим осцилографом і 500–1000 Ом – катодним осцилографом. Для зручності приєднання до вимірювальних приладів до кінців дроту датчика приварюються більш товсті вивідні провідники.

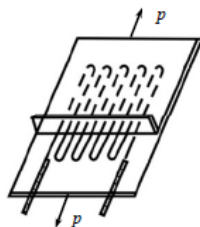


Рисунок 35 – Дротяний тензорезистор

Дротяний датчик міцно приклеюється паперовою стороною досліджуваної деталі так, щоб напрямок дротяних петель датчика збігався з напрямком вимірюваної деформації деталі. Дротяні датчики приклеюються до досліджуваної деталі за допомогою бакелітового та карбінольного клею або за допомогою спеціальних цементуючих складів. При деформації деталі дріт датчика одержує поздовжні деформації, і внаслідок цього відбувається зміна опору датчика. За зміною опору датчика судять про деформації деталі і про величину сили, що викликає цю деформацію.

Напівпровідниковими називаються омичні датчики, виготовлені з твердих напівпровідників – речовин, що надають значно більший опір електричному струму, ніж метали чи їх сплави.

Для застосування в тензодатчиках використовують найбільш зручні тонкі нитки з кремнію р-типу з питомим опором $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а також п- і р- германій.

Напівпровідникові перетворювачі можуть використовуватись замість звичайних дротяних тензодатчиків у тих випадках, коли очевидною перевагою є їх більш висока чутливість, а також для вимірювання деформації, коли дротяні тензодатчики не використовують.

Провідникові та напівпровідникові датчики розрізняються між собою фізичною природою явища зміни їх опору при деформації. Зміна опору провідників при деформації відбувається від зміни їх геометричних розмірів і від питомого опору внаслідок структурних перетворень, які відбуваються в матеріалі провідника при його деформації. При розтягуванні провідника його поперечний перетин зменшується, а питомий

опір збільшується, що викликає збільшення загального опору провідника.

У 1881р. російський фізик О. Д. Хвольсон вперше показав, що при деформації дроту змінюються не лише розміри, але і його питомий опір ρ . Дійсно, якщо б ρ не залежало від деформації дроту, то ми мали б

$$R = \frac{\rho l}{s},$$
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s},$$

де l – довжина дроту;

s – переріз дроту,

або

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \frac{\Delta l}{l},$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, такий, що дорівнює для металів від 0,24 до 0,40.

Відносна чутливість провідника до деформації дорівнює

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = (1 + 2\nu).$$

Значення K не виходили б за межі 1,48–1,80. Однак експериментальні значення $K = 2$ –3, отже, при деформації змінюється ще й питомий опір дроту ρ . У цьому випадку для K одержимо вираз

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

або

$$K = (1 + 2\nu) = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l}.$$

В основі вимірювання тиску дротяними датчиками лежить встановлене дослідом співвідношення

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l},$$

яке виражає лінійну залежність між відносною зміною початкового опору датчика R і відносною зміною довжини його дроту l при розтягуванні її в межах пружності.

У цьому співвідношенні коефіцієнт пропорційності, що зв'язує омичний опір провідника з його деформацією, називається чутливістю опору провідника або просто чутливістю провідника до деформації. Як правило, він визначається дослідним шляхом з відношення

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l}$$

за вимірними величинами відносної зміни опору і відносного подовження провідника, що викликає зміну опору.

Досліди показують, що для переважної більшості матеріалів, які застосовуються для виготовлення дротяних датчиків, чутливість їх до лінійної деформації є величиною позитивною і практично постійною як при навантаженні дроту зростаючою силою, що розтягує, так і при поступовому розвантаженні його від цієї сили. Це вказує на відсутність явища гістерезису, тобто спотворення в співвідношенні між опором і деформацією дроту при наростанні навантаження на датчик і зниженні його.

Вибір того чи іншого матеріалу для дротяного датчика визначається чутливістю дроту до деформацій, конструкцією датчика і температурними умовами роботи датчика. Останній фактор має великий вплив на властивості дротяних датчиків.

Для зменшення впливу температури провідника на його електричний опір прагнуть для тензодатчиків застосовувати сплави з дуже малим температурним коефіцієнтом опору. У цьому відношенні з наведених вище матеріалів кращі результати дають константанові, едвасові і манганінові датчики, так як для них температурні коефіцієнти набагато менші, ніж для нікеліну та ніхрому.

При неможливості вибрати дріт з необхідними температурними коефіцієнтами опору і розширенням вдаються до спеціальних прийомів компенсації впливу температури на роботу датчика.

8.3.4.1. Електрична схема тензоіндикатора

Вимірювання проводиться за допомогою мостових схем у поєднанні зі шлейфовим або катодним осцилографом і допоміжних приладів, що забезпечують реєстрацію вимірюваного тиску з необхідною точністю. У сукупності всі елементи, які беруть участь у вимірюванні тиску, утворюють загальну електричну схему тензоіндикатора.

Вхідним елементом електричної схеми тензоіндикатора, як правило, є мостова схема, показана на рис. 36. Опори R_1 , R_2 , R_3 та R_4 називаються *плечима мосту*. В точках A і B міст підключається до джерела постійного або змінного струму. Ланцюг, що живить міст струмом, називається *діагоналлю джерела струму мосту*. Між точками C і D моста включається вимірювальний пристрій G , що має вхідний опір R_g . Цей ланцюг схеми називається *вимірювальною діагоналлю мосту*.

Мостова схема залежно від співвідношення опорів плечей може перебувати у двох станах: у рівноважному і нерівноважному. *Рівноважним* називається такий стан мосту, при якому струм у вимірювальному ланцюзі дорівнює нулю. При наявності струму у вимірювальній діагоналі стан мосту називається *нерівноважним*.

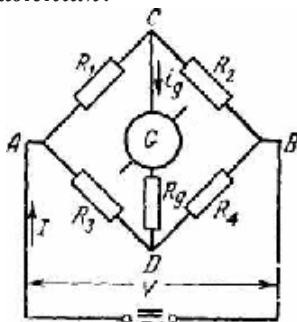


Рисунок 36 – Схема вимірювального моста

Найбільш простою є схема тензоіндикатора з мостом, що працює на постійному струмі. Структура цієї схеми наведена на рис. 37. Дія її полягає в такому. Тиск p змінюється за деяким законом (а), діє на омичний датчик D і викликає зміну його опору. Зміна опору датчика перетворюється мостовою схемою в

малі за величиною напруги (б). Останні підсилюються підсилювачем постійного струму і у вигляді напруги або струму (в) подаються до катодного (К.О) або шлейфового (Ш.О) осцилографу, де і записуються у формі кривої (г), що зобразує в деякому масштабі тиск на датчик.

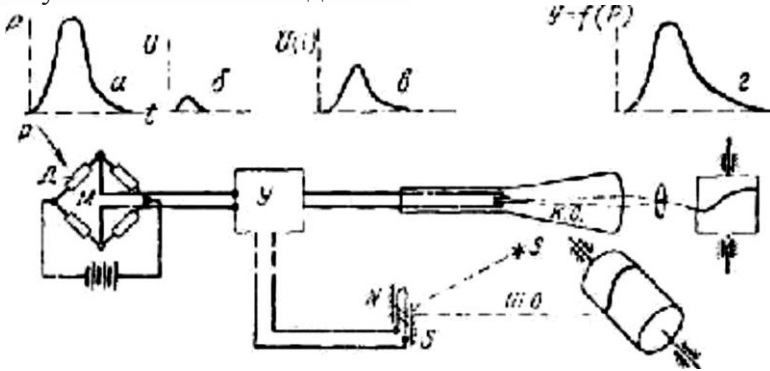


Рисунок 37 – Блок-схема тензоіндикатора з мостом , що працює на постійному струмі

Блок-схема тензоіндикатора з мостом на змінному струмі показано на рис. 38. У цій схемі джерелом живлення моста M , в одному з плечей якого знаходиться дротяний датчик D , є генератор G змінної напруги (а), постійної амплітуди і високої частоти, що називається *несучою частотою моста*. На початку вимірювань міст знаходиться в урівноваженому стані, і тому в його вимірювальній діагоналі між точками C і D різниця потенціалів дорівнює нулю.

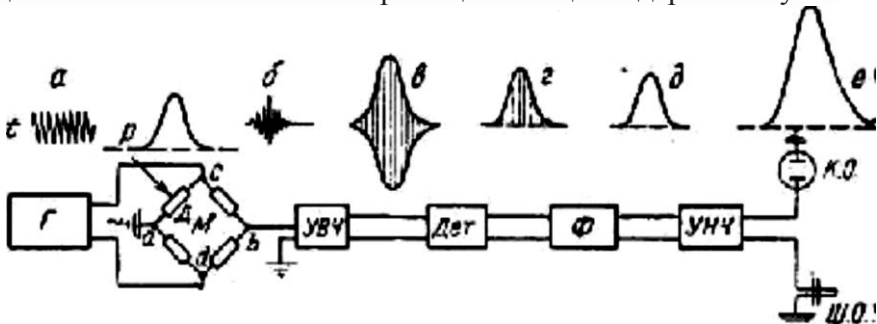


Рисунок 38 – Блок-схема тензоіндикатора з мостом на змінному струмі

При дії тиску на датчик D рівновага моста порушується, і між точками C і D виникає змінна напруга (b) тієї самої частоти, що і напруга генератора несучої частоти, але змінена за амплітудою. Модуляція напруги у вимірювальній діагоналі моста, тобто зміна амплітуди напруги несучої частоти, відбувається у результаті зміни опору дротяного датчика під дією на нього тиску. При цьому величина амплітуди модульованої напруги несучої частоти (b) на виході мосту виходить пропорційною зміні опору датчика і, отже, величині тиску, що діє на датчик.

Промодульована напруга, що знімається з діагоналі моста (b), подається на підсилювач високої частоти (УВЧ). Посилена напруга (v) передається далі на детектор (Дет.), де зрізується нижня частина модульованих коливань, у результаті чого напруга приймає форму (p). Огинаюча амплітуда цієї напруги виражає закон зміни тиску, що діє на датчик. Після детектування напруга надходить на фільтр (Φ), який відфільтровує несучу частоту і пропускає лише низькочастотну напругу (d), що має форму огинаючої коливань несучої частоти. Ця напруга потім підсилюється підсилювачем низької частоти (УНЧ) і записується катодним або шлейфовим осцилографом у формі кривої (e), що зображує в деякому масштабі закон зміни вимірюваного тиску. Разом із записом кривої тиску на осцилограму наносяться за допомогою різних пристроїв масштабні позначки часу і позначки, що характеризують окремі моменти зміни тиску.

8.3.4.2. Конструкція тензومانометрів

Манометр має сталевий порожнистий корпус 1, що вгвинчується в стовбур або манометричну бомбу. Зверху корпус наглухо загвинчений кришкою 2, а знизу закритий сталевим поршнем 3 або стовпчиком із мастики або тавоту. Порожнина 4, що утворюється всередині манометра, заповнена маслом, у якій знаходиться провідниковий датчик 5 у формі кільця з манганінового дроту. Один кінець дроту датчика з'єднаний з кришкою манометра, інший зі штифтом 6, ізольованим від тіла кришки і, який служить для підключення до вимірювальної

апаратури. У цьому манометрі тиск порохових газів p передається через поршень або мастику на масло, а останнім здійснює всебічне стискання манганінового дроту датчика.

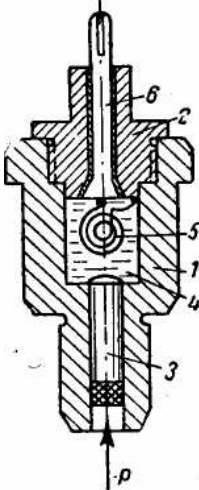


Рисунок 39 – Дротяний манганіновий тензоманометр для тисків до 500 МПа

8.3.4.3. Реєструюча апаратура

Найбільш поширеними приладами, за допомогою яких здійснюється реєстрація швидкоплинних процесів, є світлопроменеві (шлейфні) і електронно-променеві (катодні) осцилографи.

У шлейфному осцилографі запис процесу проводиться на рухомому фотопапері променем світла, відбитим від дзеркальця гальванометра (шлейфи). Гальванометр являє собою петлю з тонкого дроту із закріпленим на неї дзеркальцем, вміщену в полі постійного магніту (рис. 40). При подачі напруги на петлеподібний провідник 1, що знаходиться в полі постійного магніту 2, провідник повертається, що викликає поворот дзеркала 3, а також відхилення відбитого світлового променя на екрані осцилографа і на фотопапері стрічкопротягувального механізму. Переміщення світлових плям на поверхні рухомої фотострічки створює розгортку процесу у часі.

Спрощена оптична схема осцилографа Н-117 наведена на рис. 41.

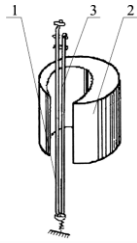


Рисунок 40 – Шлейф осцилографа

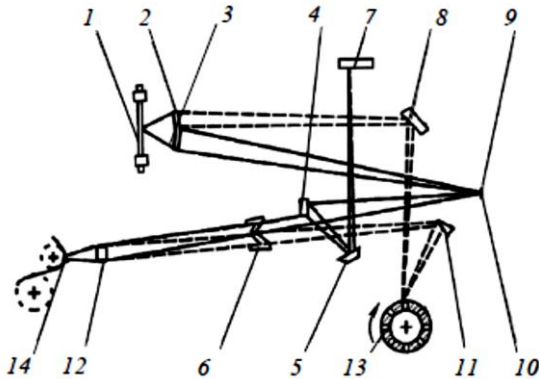


Рисунок 41 – Оптична схема осцилографа Н-117

Хід променів у каналі реєстрації та спостереження показано суцільними лініями. Тіло, що світиться, джерела світла 1 за допомогою циліндричного конденсатора 3 зображується у вигляді яскравої смуги в площині дзеркал гальванометрів 10. Від дзеркал 10 світлові пучки за допомогою сферичних лінз 9 гальванометрів і циліндричного об'єктива 12 збираються в площині фотострічки 14. Частина світлових пучків, що йдуть від дзеркал 10, відображається циліндричним дзеркалом 4 на дзеркало 5 і від нього на матовий екран 8. При повороті дзеркала гальванометра світловий пучок переміщується за екраном 7 і фотопапером 14. Для одержання відміток часу служить канал нанесення позначок часу, хід променів у якому показаний штриховою лінією. Світло від джерела 1 збирається циліндричним конденсатором 2 у площині дзеркала 8, від якого він потрапляє через щілини барабана 13 відмітчика часу на дзеркала. Відбившись від дзеркала барабана 13 і знову пройшовши через щілини барабана, світловий пучок

направляється дзеркалом 11 через діафрагму 6 на циліндричний об'єктив, який збирає його на фотострічці 14 у вигляді яскравої лінії. Частота позначок часу визначається частотою обертання барабана 13 і становить 0,002; 0,02; 0,2; 2 секунди. Реєструюча система осцилографа повинна мати досить високі параметри з чутливості, стабільності роботи і частотні характеристики. Так як друкарською частиною шлейфних осцилографів є механічна система, що володіє певною частотою власних коливань, то при реєстрації тиску необхідно вибирати шлейф, який має частоту власних коливань у декілька разів більшу, ніж характерна частота досліджуваного процесу.

У *катодному осцилографі* запис процесу здійснюється електронним променем, інерція якого настільки мала, що для області частот до 106 Гц, яка нас цікавить, може бути прийнята такою, що дорівнює нулю. Однак зберігання і обробка даних, зареєстрованих електронно-променевою трубкою, дуже незручні, що практично виключає застосування катодних осцилографів при вимірюванні тиску. В даний час у зв'язку з інтенсивним розвитком швидкодіючих персональних комп'ютерів, реєстрація та обробка сигналів, що знімаються з датчиків тиску, виконується за допомогою ПЕОМ. При цьому безперервний електричний сигнал (аналоговий сигнал) необхідно перетворити в цифровий, найчастіше двійковий код. Для виконання цієї операції використовуються аналого-цифрові перетворювачі.

8.4. Вимір швидкості снаряда

Найважливішою балістичною характеристикою пострілу є початкова швидкість боєприпасу. Від неї багато в чому залежить дальність і стійкість польоту, кучність і влучність пострілів. Для артилерійських снарядів початковою швидкістю v_0 вважається максимальна швидкість у періоді післядії, приведена до дульного зрізу.

Більшість методів вимірювання початкової швидкості засновані на визначенні часу Δt проходження БП фіксованої відстані L . Тоді середня швидкість на ділянці L визначається

$$v_{0cp} = \frac{L}{\Delta t}.$$

Очевидно, що зі зменшенням відстані L (довжини блокуючої бази) середня швидкість буде прагнути до миттєвої

$$v_{0cp} = v_0.$$

Методи вимірювання початкової швидкості поділяються залежно від способу блокування (визначення моменту проходження БП контрольної площини).

8.4.1. Рам-мішений метод

Історично першим з'явився *рам-мішений метод*, що полягає в тому, що блокування здійснюється за допомогою двох рам, на які через певну відстань, меншого калібру БП, натягується тонкий металевий дріт (рис. 42).

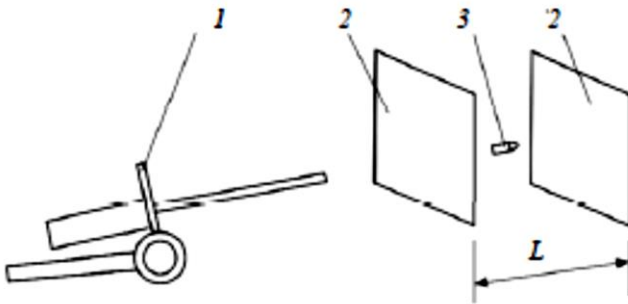


Рисунок 42 – Схема вимірювання початкової швидкості боєприпасу: 1 – знаряддя; 2 – рами-мішені; 3 – боєприпаси

Дріт рам включається в електричний ланцюг осцилографа або *хронографа* – пристрою, що вимірює інтервали часу перебування снаряда між сусідніми рамками. При проходженні снарядом рам дріт першої, а потім другої рами розривається, що дозволяє зафіксувати час проходження заданої відстані L і обчислити середню швидкість снаряда.

Балістичний хронометр «РУШ-МП» призначений для вимірювання інтервалів часу між двома однополярними або дуополярними електричними імпульсами при роботі з соленоїдними, контактними, фотоелектронними та іншими типами датчиків. Вимірювання часу хронометром

(хронографом) засноване на принципі відліку періодів електричних коливань високої і каліброваної частоти. Під дією електричних імпульсів, що виникають у блокувальних пристроях, хронограф автоматично реєструє час проходження снарядом блокуючої ділянки траєкторії. Відносна похибка вимірювання інтервалів часу в діапазоні 10^{-3} – 10 с не більше 0,05 %, дискретність вимірювання часових інтервалів 0,1 мкс. Відмінною особливістю приладів від раніше існуючих хронографів є застосування сучасної елементної бази, мікропрограмне керування, можливість розрахунку та обробки результатів на ПЕОМ.

Швидкість снаряда на вимірювальній ділянці довжиною l за вимірюванням хронографом часом прольоту снаряда обчислюють за формулою $V_{изм} = \frac{l}{\tau}$, тобто середню швидкість.

Для приведення одержаної середньої швидкості до дульного зрізу вводиться поправка ΔV , яка враховує втрату швидкості снарядом масою q і калібром d на шляху від дульного зрізу до середини відстані між рамами x і визначається за формулою

$$\Delta V = \frac{id^2x}{q\Delta D(V)} 10^4 \frac{P_0}{P_{0N}},$$

де i – коефіцієнт форми снаряда;

$\frac{P_0}{P_{0N}}$ – відносна щільність повітря;

$\Delta D(V)$ – приріст функції Сіаччі.

При стрільбі під великими кутами піднесення у формулі необхідно враховувати вплив прискорення вільного падіння.

8.4.2. Соленоїдне блокування

Залежно від типу снаряда блокування може бути рамним або безрамним. При рамному блокуванні замість рам-мішеней використовують соленоїди. *Соленоїд* являє собою каркас, на який намотаний дріт товщиною 0,2–0,4 мм із певною кількістю витків, число яких залежить від матеріалу снаряда і типу

застосовуваного хронографа. При прольоті намагніченого снаряда через соленоїд або над ним в його обмотці формується знакозмінний імпульс напруги у вигляді позитивної і негативної напівхвиль. Розміри соленоїдів залежать від калібру снаряда. Принцип роботи траєкторних соленоїдів заснований на зміні індуктивності котушок, які є датчиками прольоту снаряда. При прольоті намагніченого снаряда в обмотці соленоїда змінюється індуктивність, яка зменшується або збільшується. Вимірювальна котушка включена в коливальний контур генератора, що змінює частоту генерованих коливань відповідно до зміни індуктивності. Зміна частоти сигналу генератора перетворюється частотним дискримінатором у напруги вихідного сигналу. Вихідний формувач імпульсів запускає чи зупиняє таймер.

У позатраєкторних соленоїдах снаряд пролітає над ними. Такі соленоїди, використовувані при стрільбі снарядами з секторами, що відокремлюються, мають дві обмотки по 300 витків кожна, розташовані в пазах текстолітового каркаса з ізолюючим складом. Позатраєкторні соленоїди розміщують на відстані 6–50 м від дульного зрізу ствола. Відстань між соленоїдами не менше 1 м. При відстані між ними, що не перевищує 10 м, соленоїди поміщають у жорсткому каркасі, який кріплять на щоглах або стійках. При одночасному використанні соленоїдів і рам-мішеней відстань між різними блокуючими парами повинна бути не менше 5 м.

Соленоїди можна встановлювати також на дульному зрізі ствола. У цьому випадку снаряд оснащений високоточним електронним дистанційним підривником, розміщеним у донній частині снаряда, а установка має в своєму складі далекомір, балістичний обчислювач і надульний канал введення тимчасової установки. На дульному зрізі зняття розміщені три соленоїдних кільця. За допомогою перших двох кілець, розміщених за ходом снаряда, проводиться замір швидкості снаряда у поточному пострілі. Виміряна величина спільно з дальністю до мети, визначеної далекоміром, вводиться в балістичний обчислювач, що розраховує польотний час, значення якого вводиться у дистанційний детонатор через

кільце. У наш час такий спосіб блокування практично не застосовується. На зміну йому прийшли досконаліші магніто- та фотоелектричні методи блокування.

8.4.3. Індукційні вимірювачі швидкості

Індукційні вимірювачі швидкості реалізують той самий принцип виміру швидкості, що й індуктивні. Вони поділяються на магнітні та електромагнітні. У магнітному вимірювачі датчик виконаний на базі постійного магніту, а в електромагнітному – на базі електромагніту.

При використанні магніто-електричного методу БП перед випробуваннями намагнічується і, при пострілі, проходячи послідовно через два соленоїди, створює у них електрорушійну силу. Фіксуючи час появи струму в обмотках соленоїдів, можна визначити швидкість боєприпасу.

8.4.4. Фотоелектронне блокування

Фотоелектронне блокування здійснюється шляхом фіксації моменту проходження боєприпасом світлової площини. Перевагою цього методу є висока точність і швидкодія, а також можливість вимірювання швидкості БП, виготовлених із різних матеріалів, у тому числі неметалів.

Реєстрація часу проходження боєприпасом блокувань здійснюється за допомогою електронних балістичних хронографів, що реалізують як магніто-електричний, так і фотоелектронний принципи і дозволяють вимірювати швидкість БП на різних ділянках траєкторії, в тому числі і у перепоні. Вони можуть застосовуватися як в закритих приміщеннях (тирах), так і на відкритих і необладнаних майданчиках.

8.4.5. Оптичні вимірювачі швидкості

Оптичні вимірювачі швидкості працюють на принципі фотоелектричного блокування і виконуються, як правило, у вигляді системи, що складається з двох вимірювальних оптичних площин, рознесених на величину вимірювальної бази. Залежно від способу формування оптичних площин оптичні вимірники поділяють на світлодіодні та лазерні.

У світлодіодних вимірниках оптична площина формується світлодіодною (випромінювач) і фотодіодною (приймач випромінювання) лініями, встановленими в обойми з тонкими світлопроникними щілинами. Снаряд, пролітаючи через оптичну площину, послаблює світловий потік, що приходить на фотоприймач, у результаті чого на виході електронного пристрою формується сигнал запуску (зупинення) таймера.

У лазерних вимірниках оптична площина формується багаторазовим відображенням променя лазерного випромінювача таким чином, щоб крок променевої сітки був менше мінімального калібру снаряда (кулі) і промінь, багато разів відобразившись від системи дзеркал або дзеркальних призм, потрапляє на фотоприймач. Снаряд, проходячи через оптичну площину в будь-якій її частині, перериває світловий потік лазерного променя, що приходить на фотоприймач, чим приводить у дію електронну схему формування сигналу запуску (зупинення) таймера. Особливість лазерних вимірників – необхідність високої точності виготовлення посадкових отворів і спільного коригування ланцюга «лазер-фотодіоди». Існуючі діаметральні розміри лазерів і фотодіодів (наприклад, WLM-16K потужністю 9 Вт та розміром плями 5 мм) зумовлюють базову відстань між найближчими фотодіодами (наприклад, ФД-27К), що дорівнюють 6 мм, що обмежує контрольований мінімальний розмір тіл калібром не менше 7,62 мм. Лазерні промені утворюють паралельну оптичну сітку у вертикальній площині, щільність якої визначається виходячи з мінімального контрольованого розміру снаряда або кулі. Лазерний промінь сприймається фотоприймачем, який реєструє момент розриву оптичного ланцюга і через фотопідсилювач і аналоговий блок порівняння включає таймер (частотомір), який фіксує часовий інтервал до наступного розриву оптичного ланцюга другого контура. Враховуючи базову відстань між контурами, можна елементарними математичними операціями розраховувати середню початкову швидкість тіл на контрольній ділянці. При необхідності збільшення точності розрахунку базова відстань може бути збільшена. Схема синхронізації дозволяє управляти

фіксацією тимчасових інтервалів від 1 мкс до 600 мкс, що відповідає реєстрації швидкостей до 2 км/с із точністю до 0,2 %.

Істотним недоліку ствольних системах із проривом порохових газів у каналі ствола (зношений стовбур) або в разі утворення балістичної ударної хвилі, що поширюється попереду тіла, яке летить. В обох випадках світловий потік переривається не снарядом, а потоком високошвидкісних порохових газів, що переміщуються попереду снаряда.

Крім описаних вище способів вимірювання початкової швидкості, для її визначення можуть використовуватися і радіолокаційні методи.

8.4.6. Доплерівські локатори вимірювання швидкості снарядів

Доплерівські локатори вимірювання швидкості снарядів застосовують при стрільбі з великими кутами піднесення. Вимірювання швидкості тіла базується на ефекті Доплера – зсуві частоти відбитого від рухомого тіла сигналу відносно частоти основного сигналу. Доплерівські вимірювачі швидкостей являють собою складні і дорогі вимірювальні комплекси (типу вимірювального комплексу «Аріель»), придатні для вимірювання швидкостей на ділянках внутрішньої та зовнішньої балістики. Як правило, такі вимірники застосовуються в науково-дослідних роботах у складі вимірювальних комплексів із комп'ютерною обробкою результатів і в наш час мають обмежене поширення.

Доплерівські полігонні радіолокаційні станції призначені для визначення швидкостей мін і снарядів будь-якого типу. Станції дозволяють одержувати інформацію про швидкості на будь-якій ділянці траєкторії, початкову швидкість, середню швидкість і серединне відхилення значень початкових швидкостей у групі пострілів, поточні координати руху снаряда у вертикальній площині, швидкість і прискорення у функції часу або дальність, коефіцієнт лобового опору, число Маха і кут нахилу вектора швидкості до горизонту у функції часу і дальності. Радіолокаційна станція працює в одному з двох

режимів: за відповідним сигналом бортового прийомовідповідача або за відбитим сигналом.

8.4.7. Високошвидкісна кінозйомка

Високошвидкісна кінозйомка – це кінозйомка зі швидкістю від 200 до 10 000 кадрів за 1 секунду – здійснюється при безперервному рівномірному русі кіноплівки з використанням різних оптичних і електронних способів комутації світлового потоку. Кіноплівка в цьому методі зйомки залишається нерухомою в процесі експонування, а рухаються пучки світла, що утворюють зображення. Пучки світла створені оптичною системою. Як правило, для цього застосовують обертову дзеркальну призму. Раніше для цих цілей використовували плівкові швидкісні оптичні камери. Сучасні засоби зйомки в основному базуються на використанні високошвидкісних і надшвидкісних цифрових відеокамер. Швидкість зйомки у них може бути від декількох сотень до декількох сотень тисяч кадрів за 1 секунду. Враховуючи, що часи процесів при пострілі з гармати можуть становити від 2 до 200 мс для одержання надійних даних із величин швидкостей снарядів або куль потрібні відеокамери, які б забезпечували кількість кадрів для оброблення інформації не менше ніж 20, тобто камери зі швидкостями не менше ніж 10 000 кадрів за секунду. При фіксації вибухових процесів швидкість зйомки повинна бути на кілька порядків вищою. Умовам фіксації швидкості снарядів відповідають відеокамери різних типів.

Поряд із високошвидкісними відеокамерами для фіксації динаміки польоту снаряда можна застосовувати дворакурсну рентгенівську зйомку за допомогою рентгеноімпульсних установок, що дозволяють реєструвати процеси зі швидкістю 1 000 000 кадрів/с. Однак синхронізація моменту рентгенівського випромінювання з моментом польоту снаряда вимагає спеціальних синхронізаторів.

Список використаної літератури

1. Афанасьев Ю. А. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твердого топлива / Ю. А. Афанасьев, Ф. П. Миропольский. – Москва : Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1974.
2. Анипко О. Б. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения : монография / О. Б. Анипко, Ю. М. Бусяк. – Харьков : Академия ВВ МВД Украины, 2009. – 128 с.
3. Бурлов В. В. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов. – Москва : Машиностроение, 2006. – 461 с.
4. Захаренков В. Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий / В. Ф. Захаренков. – Санкт Петербург : Балт. гос. техн. ун-т, 2010. – 276 с.
5. Горохов М. С. Внутренняя баллистика ствольных систем / М. С. Горохов – Москва : ЦНИИ информации, 1985. – 160 с.
6. Горовой С. А. Физические основы функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Баллистика / С. А. Горовой. – Новосибирск : СГГА, 2007. – 140 с.
7. Королева А. А. Баллистика ракетного и ствольного оружия / А. А. Королев, В. А. Комочков. – Волгоград, 2010. – 472 с.
8. Губин С. Г. Баллистика / С. Г. Губин, С. А. Горовой. – Электронная версия учебного пособия, подготовлена учебно-методической группой Института оптики и оптических технологий Сибирской государственной геодезической академии.
9. Кувеко А. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твердого топлива / А. Е. Кувеко, Ф. П. Миропольский. – Москва : Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1987.

Навчальне видання

Онда Віта Іванівна

ВНУТРІШНЯ БАЛІСТИКА

Конспект лекцій

для студентів спеціальності
161 «Хімічні технології та інженерія»

Відповідальний за випуск В. І. Онда
Редактор Н. М. Мажуга
Комп'ютерне верстання В. І. Онди

Підписано до друку 20.12.2017, поз.
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,91. Обл.-вид. арк. 7,16. Тираж 30 пр. Зам. №
Собівартість видання грн к.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.