

УДК 623.423.3

І.В. ЖУПАНЕНКО, канд. техн. наук, **В.К. ЧИБІРЯКОВ**, д-р техн. наук
(Київський нац. ун-т будівництва і архітектури),
В.Г. КОРБАЧ, канд. техн. наук (ДП «ДККБ «Луч», м. Київ)

УТОЧНЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СТВОЛА

Викладено результати розрахунку параметрів власних коливань артилерійського ствола на основі розрахункової моделі товстостінної оболонки змінної товщини. Авторами запропоновано методику, що дозволяє уточнити розрахункові значення частот і форм власних коливань ствола та визначити для нього найбільш раціональну форму щодо зниження розкиду фаз коливань у момент вильоту снаряда.

Изложены результаты расчета параметров собственных колебаний артиллерийского ствола на основании расчетной модели толстостенной оболочки переменной толщины. Авторами предложена методика, позволяющая уточнить расчетные значения частот и форм собственных колебаний ствола и определить для него наиболее рациональную форму для уменьшения разброса фаз колебаний в момент вылета снаряда.

Вступ. Дана стаття присвячена дослідженню параметрів власних коливань артилерійського ствола, що становить практичний інтерес з точки зору їх впливу на початкові зовнішньо балістичні параметри — величину і напрямок вектора швидкості снаряда.

Зокрема, теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямку свідчать про істотний вплив на точність стрільби нижчих трьох тонів згинальних (в площині, перпендикулярній осі ствола) форм власних коливань. Внаслідок того, що час руху снаряда по стволу неодмінно має певний розкид, виникає розкид фаз коливань ствола, а отже, напрямку вектора швидкості снаряда в момент його вильоту з дула. Коливання першого тону, як найбільш тривалі, цікаві з точки зору співвід-

ношення періоду коливань з проміжком часу між послідовними пострілами при стрільбі безперервним вогнем. В такому випадку несприятливим є резонанс коливань, збуджених кожним наступним пострілом, з коливаннями, що не згасли після попереднього. При стрільбі одиночним вогнем домінантним є вплив коливань другого або третього тону, які спричиняють більший, порівняно з коливаннями першого тону, кут відхилення дульної частини ствола.

Сучасні дослідження виявили також вплив радіальних осесиметричних коливань ствола, за рахунок яких діаметр каналу ствола періодично відхиляється від номіналу (калібру). В результаті цього, залежно від частоти і амплітуди коливань змінюється сила тертя снаряда об стінки каналу ствола і, відповідно, початкова швидкість снаряда в зовнішньо балістичному процесі.

Загальновідомі методики розрахунку параметрів власних коливань базуються на стержневій розрахунковій моделі, що дозволяє отримати доволі наближені результати і, що найбільш суттєво, не дозволяє оцінити амплітуди та періоди радіальних коливань. Враховуючи складність геометрії ствола (рис. 1), визначення параметрів коливань об'єкта на

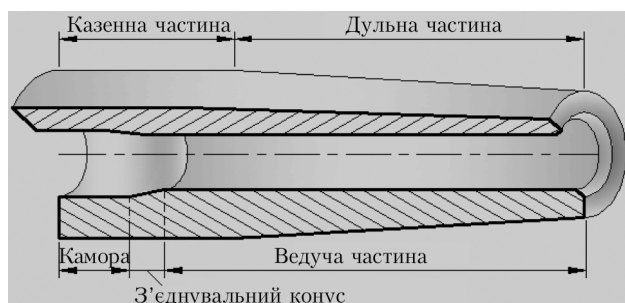


Рис. 1. Конструктивна форма артилерійського ствола

© І.В. ЖУПАНЕНКО, В.К. ЧИБІРЯКОВ, В.Г. КОРБАЧ, 2014

основі розрахункової моделі складеної товстостінної оболонки змінної товщини дозволить не лише істотно уточнити та доповнити розрахунок, але і завдяки точній апроксимації геометрії об'єкта дослідити закономірність зміни амплітуд та періодів коливань ствола залежно від конфігурації зовнішньої стінки останнього.

Постановка задачі. Метою даної роботи є застосування розробленої раніше авторами методики розрахунку параметрів власних коливань товстостінних оболонок обертання [1–3] для уточнення частот і форм власних коливань артилерійського ствола.

Короткий опис методики. Розроблена методика розрахунку частот і форм власних коливань товстостінних оболонок обертання змінної товщини є двохетапною. Перший, аналітичний, етап методики полягає в зведенні тривимірної динамічної задачі теорії пружності до одновимірної задачі на власні значення для товстостінних оболонок обертання.

Вихідна математична постановка задачі про власні коливання оболонок формулюється як задача на власні значення для системи диференціальних рівнянь першого порядку в частинних похідних (по просторових координатах) з однорідними граничними умовами у вигляді алгебраїчних співвідношень.

Редукція по товщині оболонки здійснюється шляхом застосування узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень [4], що базується на розкладі шуканих функцій напружено-деформованого стану оболонки в ряди по системі нормованих поліномів Лежандра. В результаті цього задача зводиться до двовимірної і описується системою диференціальних рівнянь в частинних похідних (по двох — поздовжній і коловій — просторових координатах) відносно функціональних коефіцієнтів розкладу по системі нормованих поліномів Лежандра (моментів невідомих функцій напружено-деформованого стану).

Далі до отриманих таким чином двовимірних рівнянь застосовано метод Фур'є з розкладом функцій в ряд по коловій координаті. Таким чином, двовимірна система рівнянь зводиться до послідовності самостійних під-

систем звичайних диференціальних рівнянь відносно функціональних коефіцієнтів розкладу моментів компонент напружено-деформованого стану оболонки в ряди Фур'є.

Остаточно постановка редукованої задачі про власні коливання товстостінних оболонок формулюється як задача на власні значення для системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, записаної в нормальній формі Коші з граничними умовами для невідомих вектор-функцій, записаними у вигляді алгебраїчних співвідношень.

Чисельний етап методики полягає в застосуванні для розв'язання отриманих на попередньому етапі редукованих одновимірних крайових задач на власні значення алгоритму покрокового пошуку з розв'язанням двоточкових лінійних крайових задач n -го порядку методом ортогональної прогонки С.К. Годунова при інтегруванні відповідних задач Коші за алгоритмом Рунге–Кутта–Мерсона четвертого порядку точності.

Враховуючи особливості поставленої задачі варто відзначити, що запропонована методика вільна від обмеження відносної товщини об'єкта. На відміну від класичної теорії оболонок, в якій серединна поверхня оболонки не є базовою, розроблений метод дозволяє моделювати ствол як товстостінну оболонку обертання змінної товщини.

Аналіз результатів. За найбільш поширеним підходом для наближеного визначення періоду власних згинальних коливань ствола приймається стержнева розрахункова модель. Вважається, що стержень защемлений по казенному зрізу (лівий край) і вільний від закріплень по дульному зрізу (правий край).

В першому наближенні приймається, що стержень має постійний поперечний переріз (рис. 2, *a*).

Колові частоти нижчих тонів згинальних коливань порожнинної циліндричної консолі визначаються співвідношенням [5]:

$$\omega_i = \frac{c_i^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \text{ або} \quad (1)$$

$$\omega_i = \frac{c_i^2}{2l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{(R^2 + r^2)},$$

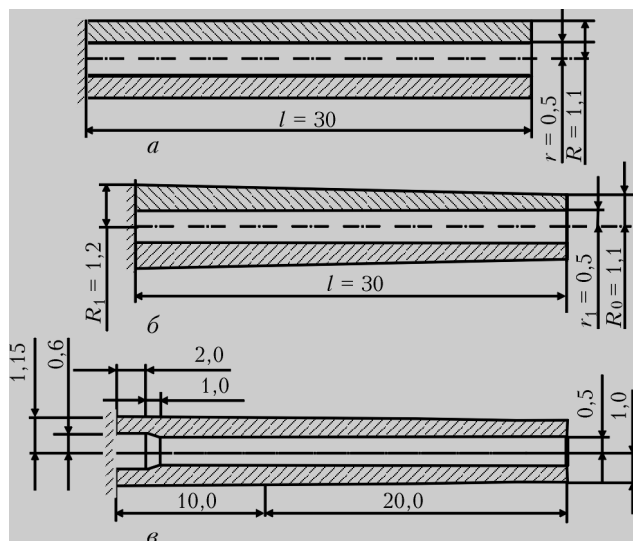


Рис. 2. Розрахункові схеми артилерійського ствола: а – перша наближена; б – друга наближена; в – третя

де $c_1 = 1,875$, $c_2 = 4,694$, $c_3 = 7,855$ для першого, другого и третього тонів відповідно; E , ρ – модуль пружності та щільність матеріалу; F , l – площа та момент інерції кільцевого перерізу; R , r – зовнішній радіус та радіус порожнини відповідно; l – довжина стержня; m – погонна маса.

Уточнена розрахункова схема консольної частини ствола приймається у вигляді усіченого конуса з циліндричним каналом (рис. 2, б). Колові частоти першого і другого тонів згинальних коливань порожнинної конічної консолі визначаються за формулами роботи [6]:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{j^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} (0,81\sqrt{R_1^2 + r_1^2} - 0,5302\sqrt{R_0^2 + r_1^2}),$$

$$\omega_2 = \frac{2\pi}{j^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} (1,3823\sqrt{R_1^2 + r_1^2} + 0,3711\sqrt{R_0^2 + r_1^2}).$$

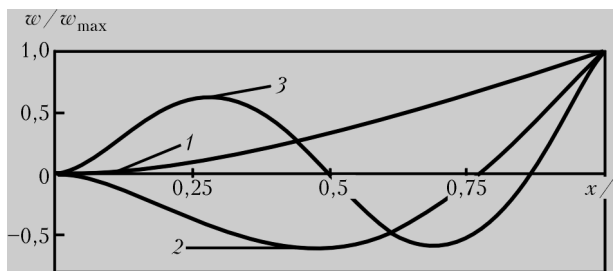


Рис. 3. Форми власних коливань розрахункової моделі ствола (позначення за текстом)

Подальшим уточненням є розрахункова модель товстостінної оболонки змінної товщини (рис. 2, в), що дозволяє врахувати як конструктивну форму каналу ствола, так і зміну товщини його стінок. Частоти нижчих тонів згинальних коливань консольної оболонки визначаються за описаною вище методикою.

В таблиці наведено розрахункові значення нижчих власних частот згинальних та вісисиметричних радіальних коливань показаних на рис. 2 розрахункових моделей. В стовпцях 1 наведено значення, отримані за класичною теорією коливань стержнів за формулами (1) і (2) для моделі 1 (рис. 2, а) та моделі 2 (рис. 2, б) відповідно. В стовпцях 2 наведено значення, отримані за описаною вище методикою.

Як видно з таблиці, розрахунок параметрів коливань ствола за описаною вище методикою дозволяє уточнити (порівняно зі стержневою моделлю) розрахункові значення частот до 14 %.

Стосовно радіальних коливань загально прийнятою є розрахункова модель товстостінної труби. Натомість точна апроксимація гео-

Розрахункові значення нижчих частот згинальних та радіальних коливань

Форми коливань	Частоти, Гц	Номер розрахункової моделі				
		1		2		3
		Класична теорія	Розроблений метод	Класична теорія	Розроблений метод	Розроблений метод
Згинальні	ω_1	11,91	12,47	16,22	14,78	14,28
	ω_2	74,66	73,31	77,94	77,46	76,14
	ω_3	209,1	196,1	–	–	197,8
Радіальні	ω_{01}	–	264,6	–	289,8	283,5
	ω_{02}	–	793,3	–	802,6	789,3
	ω_{03}	–	1320	–	1326	1318

метрії ствола (розрахункова модель 3) дозволяє до 7 % уточнити значення частот порівняно з моделлю труби постійної товщини (розрахункова модель 1).

Оболонкова розрахункова модель також дозволяє уточнити форми коливань. Наприклад, за теорією коливань стержнів вузол коливань другого тону знаходиться на відстані $0,22l$ від вільного кінця, а вузловий діаметр оболонкової моделі — на відстані $0,23l$, тобто різниця складає 4,5 %.

Характер згинальних форм коливань ($w/|w_{\max}|$) для розрахункової моделі 3 показано на рис. 3, де цифрами позначені номери тонів. Отримані форми коливань дозволяють оцінити вплив окремих тонів коливань на напрямок вектора швидкості снаряда в момент вильоту. Як видно з рис. 3, для ствола, що розглядається, найбільший вплив мають коливання третього тону, оскільки дають найбільший кут відхилення дульного зрізу.

Висновок. Розрахунок параметрів власних коливань артилерійського ствола на основі запропонованої методики дозволяє уточнити розрахункові значення для згинальних коливань та визначити параметри власних радіальних коливань. Крім того, можливість точного мо-

делювання зміни геометрії ствола дозволяє визначити для нього найбільш раціональну форму та товщину і тим самим зменшити розкид фаз коливань в момент вильоту снаряда. Розроблена методика дозволяє додатково враховувати неоднорідність властивостей матеріалу ствола, що виникає при нагріванні його пороховими газами. ■

Список літератури

1. Чибіряков В.К., Жуваненко І.В. Власні коливання товстої циліндричної оболонки // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. — 2009. — Вип. 84. — С. 127–133.
2. Чибіряков В.К., Жуваненко І.В. Власні коливання товстостінної оболонки обертання змінної товщини // Промислове будівництво та інженерні споруди. — 2010. — № 2. — С. 5–9.
3. Жуваненко І.В. Динамика толстостенных оболочек вращения // Актуальные проблемы механики деформируемого твёрдого тела: VI Междунар. науч. конф., 8–11 июня 2010 г. Донецк: Юго-Восток, 2010. — С. 159–163.
4. Чибіряков В.К., Смоляр А.М. Теорія товстих пластин та оболонок. — Черкаси: ЧДТУ, 2002. — 160 с.
5. Кириллов В.М. Основания устройства и проектирования стрелкового оружия. — Пенза: ПВАИУ, 1963. — 342 с.
6. Орлов Б.В. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / Б.В. Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов. — М.: Машиностроение, 1976. — 432 с.