

УДК.629.76.036

І. Б. Безкровний, М. Т. Лисенко, О. О. Трегубенко

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ БІЧНОЇ СИЛИ, ЗУМОВЛЕНОЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТОМ І ПЕРЕКОСОМ ВЕКТОРА ТЯГИ РДТП

Обґрунтовано проведення експериментальних робіт щодо визначення бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги РДТП, розглянуто конструктивну схему стапеля для відповідних експериментальних робіт з вертикальним положенням осі двигуна й описано принцип роботи стапеля.

The paper gives reasons for conducting experimental works to determine lateral force caused by eccentricity and skew of SRM thrust vector, considers the configuration of fixed test stand for respective experimental works with vertical position of motor axis and describes the fixed test stand operation principle.

**Вступ.** Основним етапом експериментального відпрацювання ракетних двигунів на твердому паливі є вогневі стендові випробування, що проводять з використанням спеціального стендового обладнання – стапелів, які повинні забезпечувати експериментальне підтвердження виконання вимог технічного завдання до обсягів і точності вимірювань силових параметрів двигунів. Головним силовим параметром двигуна є вектор тяги, який характеризується абсолютним значенням (модулем), ексцентриситетом і кутовим відхиленням – параметрами, заданими в технічному завданні на розроблення ракетних двигунів, які необхідно визначати та підтверджувати.

Ексцентриситет вектора тяги – це відхилення вектора тяги під час роботи двигуна відносно його конструктивної базової осі в площині критичного перерізу сопла  $\varepsilon$  (рис. 1).

Переко́с (кутове відхилення) вектора тяги – це кут між вектором тяги та конструктивною базовою віссю двигуна  $\alpha$  (рис. 1).

**Поставлення завдання.** Ексцентриситет і переко́с вектора тяги спричиняють виникнення бічних складових вектора тяги, які викликають збурення в русі ракети, тому їх необхідно визначати.

Визначення ексцентриситету та переко́су вектора тяги можливе як непрямим методом – шляхом розрахунків або вимірювань геометричних параметрів двигунів, так і прямим – шляхом вимірювання бічної сили, яка виникає внаслідок ексцентриситету та

переко́су вектора тяги, під час вогневих стендових випробувань двигуна.

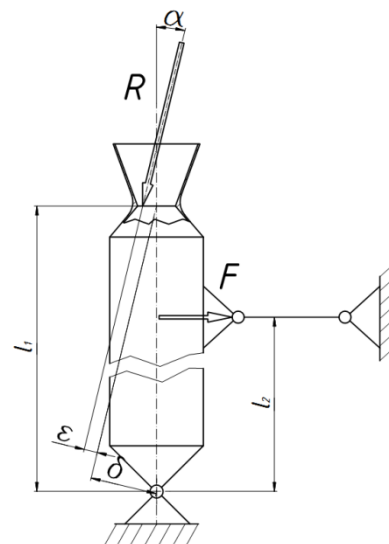


Рис. 1. Схема для розрахунку бічної сили:  $\varepsilon$  – ексцентриситет вектора тяги;  $\alpha$  – переко́с вектора тяги;  $R$  – вектор тяги;  $F$  – бічна сила;  $l_1$  – відстань від опори до площини критичного перерізу сопла двигуна;  $l_2$  – плече бічної сили;  $\delta$  – плече сили тяги

Вогневі стендові випробування двигуна можливі як з горизонтальним, так і з вертикальним положенням його осі [1]. Якщо під час випробування вісь двигуна має горизонтальне положення, то змінна у часі сила тяжіння, що діє на двигун, перпендикулярна до осі і додається до бічної сили, що значно ускладнює виокремлення останньої з результуючої бічної сили. Тому під час відпрацювання ракетних двигунів із застосуванням стапелів, які забезпечують го-

ризонтальне положення осей двигунів [2], ексцентриситет і перекіс вектора тяги підтверджують розрахунками або вимірюванням геометричних розмірів двигунів. Проте слід відзначити, що розрахунки і вимірювання геометричних розмірів двигунів не враховують зміни геометрії двигуна внаслідок дії тиску в камері згоряння, високої температури та зміни геометрії контуру сопла, які спостерігаються впродовж усього часу роботи двигуна, а це знижує достовірність і точність визначення ексцентриситету та перекоосу вектора тяги, що не дозволяє точно оцінити їх вплив на політ ракети.

Потрібну достовірність і точність вимірювань бічної сили можна забезпечити прямим вимірюванням, якщо під час випробувань вісь двигуна матиме вертикальне положення. При цьому сила тяжіння, що діє на двигун, спрямована вздовж його осі і ніяк не спотворює бічну силу, значення якої менше від значення ваги двигуна та на декілька порядків менше від значення тяги.

Точність визначення ексцентриситету й перекоосу вектора тяги та їх вплив на політ ракети особливо важливі під час відпрацювання маршових двигунів реактивних снарядів залпового вогню (некерованих снарядів) і нарівні з точністю вимірювання модуля тяги є одним з пріоритетних завдань, які стоять перед розробниками цих двигунів.

Зважаючи на те, що наявність ексцентриситету та перекоосу вектора тяги під час роботи двигуна призводить до появи бічної сили, за результатами вимірювання цієї сили під час вогневих стендових випробувань з вертикальним положенням осі двигуна можна з достатньою точністю визначити (оцінити) ексцентриситет і перекіс вектора тяги.

Точність вимірювання бічної сили залежить від точності датчиків сили, які застосовують у стапелі, і від конструкції стапеля.

**Варіант вирішення поставленого завдання.** На рис. 2 наведено варіант конструктивної схеми стапеля для вертикальних стендових випробувань маршових двигунів реактивних снарядів залпового вогню. Стапель з такою конструктивною схемою забезпечить належну точність

вимірювання не тільки тяги, а й бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекоосом вектора тяги.

Стапель складається зі станини 10, на якій закріплено вимірювальний вузол 9 з датчиком сили 8. На сферичну поверхню датчика сили 8 опирається опора 6, закріплена через мембрану 7 на корпусі вимірювального вузла 9, при цьому точка контакту сферичної поверхні датчика сили 8 з опорою 6 розміщена в горизонтальній площині симетрії мембрани 7.

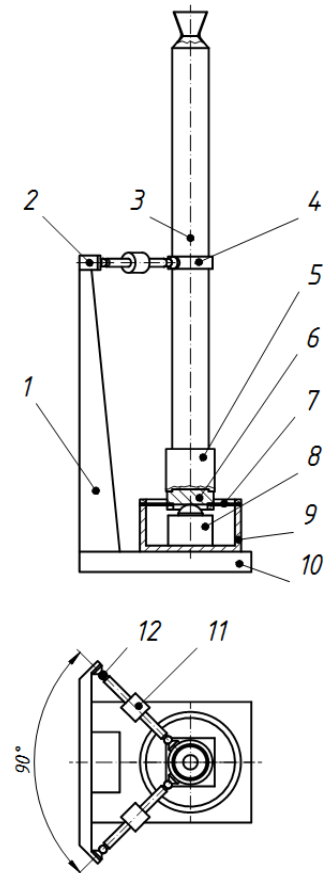


Рис. 2. Конструктивна схема стапеля:

- 1 – стояк; 2 – кронштейн; 3 – двигун; 4 – бандаж;
- 5 – рама; 6 – опора; 7 – мембрана; 8 – датчик сили;
- 9 – вимірювальний вузол; 10 – станина; 11 – датчик сили розтягнення-стиснення; 12 – сферичний шарнір

На опорі 6 закріплено раму 5, на якій закріплено двигун 3. Конструкції рами 5 і вимірювального вузла 10 виконані такими, що забезпечують сумісність осей двигуна 3 та датчика сили 8. Закріплення двигуна 3 на корпусі вимірювального вузла 9 через мембрану 7 уможливило його переміщення по лінії дії тяги

рахунок прогину мембрани 7 під час деформації датчика сили 8, так і поворот двигуна 3 відносно точки контакту сферичної поверхні датчика сили 8 з опорою 6 за рахунок деформації мембрани 7. Фіксацію двигуна у вертикальному положенні забезпечують зв'язки, виконані у вигляді мембрани і двох вимірвальних вузлів, кожен з яких складається з датчика сили розтягнення-стиснення 11 з елементами кріплення, що мають сферичні шарніри 12, які з'єднують бандаж 4, установлений на корпусі двигуна, з кронштейном 2, закріпленим на стояку 1.

При цьому осі датчиків сили розтягнення-стиснення 11 вимірвальних вузлів розміщено в одній горизонтальній площині під кутом  $90^\circ$  між собою, а точка їх перетину знаходиться на конструктивній базовій осі двигуна 3. Сферичні шарніри 12 у вимірвальних вузлах, які з'єднують двигун 3 зі стояком 1, забезпечують переміщення двигуна 3 відносно стояка 1 під час деформацій, причому з мінімальними втратами сили на ці переміщення.

Отже, закріплення двигуна у стапелі зв'язками у вигляді мембрани 7 і вимірвальних вузлів зі сферичними шарнірами 12 уможливило переміщення двигуна 3 вздовж своєї осі для вимірювання тяги датчиком сили 8 та поворот двигуна відносно точки контакту сферичної поверхні датчика сили 8 з опорою 6 для вимірювання бічної сили датчиками сили розтягнення-стиснення 11, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги.

Розрахувати бічну силу, зумовлену ексцентриситетом і перекосом вектора тяги, можна за схемою (див. рис. 1).

Моменти сил  $R(t)$  (поточне значення тяги) і  $F(t)$  (поточне значення бічної сили) протилежні та рівні, тоді

$$R(t)(\delta + \varepsilon) = F(t)l_2. \quad (1)$$

Ураховуючи, що

$$\delta = l_1 \sin \alpha, \quad (2)$$

формула для розрахунку поточного значення бічної сили матиме такий вигляд:

$$F(t) = \frac{R(t)(l_1 \sin \alpha + \varepsilon)}{l_2}. \quad (3)$$

За формулою (3) можна розрахувати максимальне поточне значення бічної сили

$$F(t)_{\max} = \frac{R(t)(l_1 \sin \alpha_{\max} + \varepsilon_{\max})}{l_2}, \quad (4)$$

де  $\alpha_{\max}$  – максимальне значення кутового відхилення вектора тяги від конструктивної базової осі;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальне значення ексцентриситету вектора тяги – величини, які задають у технічному завданні на розроблення двигуна.

Оскільки під час випробування двигуна поточне значення бічної сили  $F(t)$  вимірюють за допомогою двох датчиків сили розтягнення-стиснення із взаємно перпендикулярними осями, то її значення обчислюють за формулою

$$F(t) = \sqrt{F_1(t)^2 + F_2(t)^2}, \quad (5)$$

де  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  – поточні показання датчиків сили.

Якщо поточні значення бічної сили  $F(t)$ , визначені за час випробування двигуна згідно з формулою (5), не перевищуватимуть максимальних поточних значень бічної сили  $F(t)_{\max}$  [тобто  $F(t) \leq F(t)_{\max}$ ], то значення ексцентриситету і перекоосу вектора тяги двигуна знаходяться в межах, заданих у технічному завданні на розроблення двигуна.

Отже, стапель з наведеною конструктивною схемою забезпечить належну точність вимірювань тяги, а також експериментальне визначення бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги.

Ці можливості стапеля зумовлені:

1. Конструктивним забезпеченням вертикального положення конструктивної базової осі двигуна під час випробування, що виключає вплив ваги двигуна на точність вимірювання бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги.

2. Конструктивним забезпеченням сумісності осі датчика сили для

вимірювання тяги з конструктивною базовою віссю двигуна (вектором тяги двигуна), що виключає вплив конструкції стапеля на точність вимірювання бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги.

3. Конструктивним забезпеченням перпендикулярності осей датчиків сили розтягнення-стиснення до конструктивної базової осі двигуна та застосуванням сферичних шарнірів, що виключає вплив конструкції стапеля під час деформаційних переміщень його елементів і вузлів під дією тяги та бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги, на точність її вимірювання.

4. Закріпленням двигуна на мембрані вимірювального вузла, що забезпечує свободу переміщення випробовуваного двигуна за рахунок деформації мембрани як по лінії дії тяги, так і в напрямках дії бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги, з мінімізованими втратами тяги та бічної сили на деформацію мембрани.

5. Використанням високоточного двоканального датчика сили типу ДЭДВУ-2М категорії точності 0,2 для вимірювання тяги. Використанням двох високоточних датчиків сили розтягнення-стиснення типу U2B категорії точності 0,15 для вимірювання бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги.

**Висновок.** На підставі наведених матеріалів можна зробити висновок, що конструктивне забезпечення вертикального положення конструктивної базової осі двигуна під час випробування, використання зв'язків у вигляді мембрани і двох вимірювальних вузлів з високоточними датчиками сили розтягнення-стиснення зі сферичними шарнірами, розміщеними в одній горизонтальній площині, для вимірювання бічної сили дозволяє вирішити завдання щодо визначення тяги та бічної сили, зумовленої ексцентриситетом і перекосом вектора тяги, що експериментально підтверджує виконання вимог технічного завдання до обсягів і точності вимірювань силових параметрів двигунів.

#### Список використаної літератури

1. Волков В. Т., Ягодников Д. А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 296 с.
2. Бескровный И. Б., Кириченко А. С., Балицкий И. П. и др. Опыт предприятия по проектированию и эксплуатации стапелей для испытаний РДТТ // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2008. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное". – С. 119–127.

Стаття надійшла 21.06.2017