

RAKETINIO KIETOJO KURO VARIKLIO KONSTRUKCIJOS IR TRAUKOS CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

**Povilas Šaulys, Algimantas Fedaravičius,
Arvydas Survila**

Kauno technologijos universitetas

Anotacija. Nagrinėjamos raketinio kietojo kuro variklio konstrukcijos. Aprašoma kietojo kuro variklio traukos formulė. Aptariama kietojo kuro variklio tyrimo stendo schema ir veikimo principas, nagrinėjama gauta traukos charakteristika.

Įvadas

Raketinis kietojo kuro variklis – reaktyvinis variklis, kuriam veikti reikia aplinkos terpės (oro). Kurą padega paleidimo variklis arba dūminio parako degtuvas. Paleistas variklis paprastai veikia tol, kol išdega visas kuras. Reaktyvinės čiurkšlės tekėjimo greitis – iki 3 500 m/s. Traukos jėga reguliuojama, didinant arba mažinant kuro degimo paviršių, kritinį reaktyvinės tūtos skerspūvį [1]. Raketinis kietojo kuro variklis praktiškai visada yra parengtas darbui, per trumpą laiką sukuria didelę traukos jėgą (nešančiųjų raketų raketinis variklis – iki 16 MN). Trūkumai: didelė konstrukcijos masė, kuras neatsparus smūgiams ir temperatūros pokyčiams, variklis trumpai veikia, traukos vektorių reguliuoti sunkiau negu skystojo kuro variklio, specifinė trauka mažesnė – iki 3 kNs/kg.

Raketinio kietojo kuro variklio konstrukcijos

Raketinio kietojo kuro variklis susideda iš variklio degimo kameros, kuro talpyklos, slėgio reguliavimo sistemos, kuro padavimo sistemos, taip pat valdymo ir reguliavimo sistemos [2].

Variklio degimo kamera – tai kameros dalis, kurioje vyksta kuro degimo procesas ir susidariusių dujų šiluminė energija verčiama kinetine srauto energija, sukuriančia jėginę (reaktyvinę) trauką.

Kuro talpyklos (bakai) skirti variklio kuro komponentams patalpinti. Kietojo kuro varikliuose kuro talpyklų funkciją atlieka degimo kamera.

Slėgio reguliavimo sistema – tai įrenginių sistema, kuri užtikrina reikiamo didumo slėgį kuro talpyklose variklio darbui užtikrinti.

Kuro padavimo sistema – tai įrenginių visuma, kuri užtikrina kuro padavimą reikiamu režimu (slėgio, kiekio) į variklio degimo kamerą.

Valdymo ir reguliavimo sistemos užtikrina variklio paleidimą ir stabdymą, taip pat reikiamą jo degimo kameros darbo režimą.

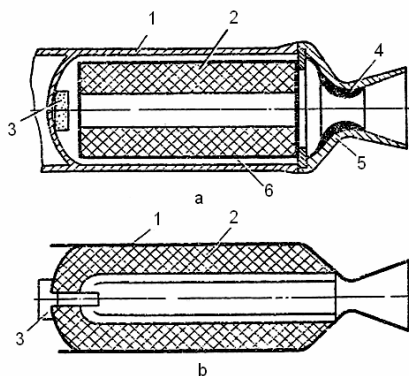
Raketinis kietojo kuro variklis pagal kuro užtaisų išdėstymo būdą skirstomas į:

- vieno užtaiso;
- atskirų užtaisų.

Vieno užtaiso variklio konstrukcijoje kuras variklio degimo kameroje susideda iš vienos arba kelių dalių. Didelės traukos varikliuose daugiausiai naudojami vienos dalies užtaisai. Priklausomai nuo kuro užtaisų variklio degimo kameroje būklės, varikliai skirstomi į variklius su įdedamais (laisvais) užtaisais ir variklius, kuriuose kuro užtaisai pritvirtinti prie kameros sienelių.

1 pav., a, parodyta konstrukcinė raketinio kietojo kuro variklio su vienu užtaisu schema.

Kuro užtaisai paleidžiant variklį padegami degikliu. Padegus dega tik užtaiso kanalo vidinis paviršius, kadangi kanalo išorinis paviršius ir galai padengti apsauginiu sluoksniu. Jei galuose nėra tarpiklių, tai



1 pav. Konstrukcinės raketinio kietojo kuro variklio schemas:
 a – su įdedamu užtaisu; b – su įtvirtintu užtaisu; 1 – korpusas;
 2 – kuro užtaisas; 3 – degiklis; 4 – sunkiai besilydanti įvorė;
 5 – tūta; 6 – apsauginis sluoksnis

visą variklio darbo laiką korpuso sienelės veiks karštų dujų srautas, dėl to sienelės reikės apsaugoti papildomai. Įstačius kelias ar nors vieną įvorę, korpuso sienelių apsauga supaprastėja, kadangi dujos tarpelyje neteka [2, 3].

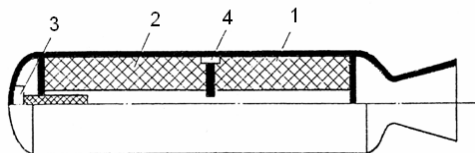
Šio raketinio kietojo kuro variklio su vienu užtaisu trūkumas tas, kad kamera užtaisyta didelių matmenų ir masės užtaisais ir kad karšti degimo produktai veikia tiesiogiai degimo kameros sienelės.

1 pav., b, parodyta konstrukcinė raketinio kietojo kuro variklio schema, kurioje kuro užtaisas pritvirtintas prie variklio kameros sienelių. Šiuo atveju kuro masė tiesiogiai supilama į variklio degimo kamerą, kurios vidinis paviršius prieš užpildant apdirbamas taip, kad kuras gerai sukibtų su kameros sienelėmis. Tam, kad būtų suformuota kuro užtaiso viduje cilindrinė tuštuma, reikalinga kurui degti, įmontuojama tuščiaavidurė įvorė, kuri užpylus tūtą kuru išimama iš degimo kameros. Degimas vyksta užtaiso vidinio kanalo paviršiumi. Tokiu būdu kameros sienelės mažiau veikiamos didelių temperatūrų ir slėgių.

Šios raketinio kietojo kuro variklio konstrukcijos su pritvirtintu užtaisu trūkumas – dideli užtaise atsirandantys įtempiai, kadangi

pritvirtinto užtaiso ir degimo kameros sienelių linijinio plėtimosi koeficientai skirtingi. Dėl įtempių gali atsirasti įtrūkių.

Konstruktinė raketinio kietojo kuro variklio su atskirais užtaisais schema parodyta 2 pav.

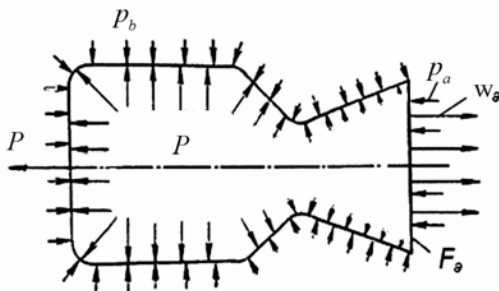


2 pav. Konstrukcinė raketinio kietojo kuro variklio su atskirais užtaisais schema: 1 – užtaisas su oksidatoriaus pertekliumi; 2 – užtaisas su degalų pertekliumi; 3 – degiklis; 4 – droselis

Traukos skaičiavimas

Raketinio kietojo kuro variklio konstrukcijos tobulumą, ekonomiškumą apibūdina traukos jėga, santykinė trauka, santykinis kuro sunaudojimas ir santykinė variklio masė [2].

Raketinio kietojo kuro variklio trauka yra visų jėgų, kurios veikia degimo kamerą darbo metu, atstojamoji, išskyrus svorio ir atramų reakcijos jėgas. Tai reiškia, kad variklio trauką lemia degančio kuro dujų slėgio į variklio kameros vidinį paviršių, taip pat išorinės aplinkos poveikio jėgos (3 pav.).



3 pav. Slėgio jėgų pasiskirstymo į vidinį ir išorinį variklio paviršius schema

Traukos jėga P , laikant, kad dujų tekėjimas iš variklio tūtos yra tolygus, apskaičiuojama taip:

$$P = G\omega_a + F_a(p_a - p_h), \quad (1)$$

čia: G – kuro masės sąnaudos per sekundę, kg/s; ω_a – dujų ištekėjimo greitis iš tūtos, m/s; F_a – tūtos galo skerspjūvio plotas, m²; p_a – slėgis tūtos galo skerspjūvyje, N/m²; p_h – aplinkos slėgis (atmosferinis slėgis), N/m².

Iš (1) lygties matyti, kad traukos jėga priklauso nuo aukščio, kuriame veikia variklis. Aukščiui didėjant ir atmosferiniam slėgiui p_h mažėjant, variklio traukos jėga didėja. Jei $p_h = 0$ (variklis veikia vakuume), tai traukos jėga

$$P_t = G\omega_a + F_a p_a. \quad (2)$$

Rakietinio kietojo kuro variklio traukos jėgos (1) lygtis tinka tam atvejui, kai ištekančio dujų srauto kryptis sutampa su tūtos ašimi. Trauka matuojama tonomis, kilogramais, niutonais.

Santykine trauka laikomas variklio traukos santykis su kuro sąnaudomis, sudeginamomis degimo kameroje per sekundę:

$$P_s = \frac{P}{G}$$

arba

$$P_s = \omega_a + \frac{F_a}{G}(p_a - p_h). \quad (3)$$

Reikia pažymėti, kad variklio degimo kameros (kamerų) ir variklio agregato santykinės traukos reikšmės yra skirtingos. Tam, kad būtų nustatytas variklio agregato santykinės traukos dydis, reikia apskaičiuoti variklio traukos santykį su suminiu kuro sunaudojimu, įskaitant ir papildomas kuro sąnaudas.

Santykinis traukos dydis priklauso nuo kuro rūšies ir nuo variklio procesų parametrų. Raketinio kietojo kuro variklio santykinė trauka yra $2000 - 2500 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \left(200 - 250 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \right)$.

Kietojo kuro raketų varikliuose naudojama ne santykinė trauka, o vienetinio impulso sąvoka, kuria laikomas pilnojo impulso santykis su vieno kilogramo kuro mase:

$$I_1 = \frac{\int_0^{\tau} P dt}{m}, \quad (4)$$

čia: τ – pilnasis variklio darbo laikas; m – kietojo kuro užtaiso masė.

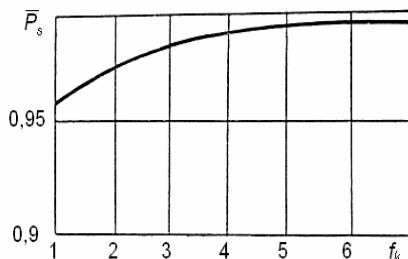
Santykinis kuro sunaudojimas – tai raketinio variklio kuro sunaudojimas per vieną sekundę vienam traukos kilogramui. Jis apibūdina variklio darbo ekonomiškumą ir yra dydis, atvirkščiai proporcingas santykinėi traukai [2].

Raketinio kietojo kuro variklio santykinė masė yra variklio masės M_v santykis su jo sukuriama ant žemės paviršiaus trauka:

$$\gamma_v = \frac{M_v}{P_a}. \quad (5)$$

Suprantama, kuo mažesnė variklio santykinė masė, tuo kompaktiškesnis ir ekonomiškescnis variklis.

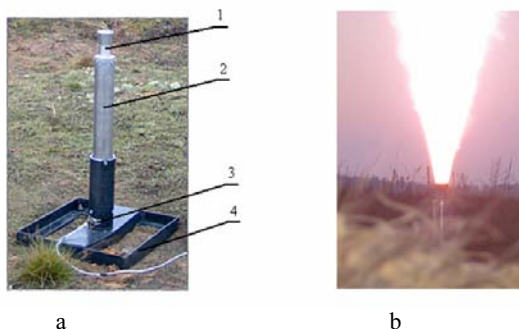
Nagrinėjant raketinio kietojo kuro variklio traukas, 4 pav. parodyta santykinės traukos \bar{P}_s priklausomybė nuo bedimensio ploto f_k (degimo kameros skerspjūvio ploto ir tūtos kritinio skerspjūvio ploto santykis), kai dujų plėtimosi tūtoje procesas yra adiabatinio pobūdžio. Iš grafiko matyti, kad kaip $f_k < 2,5 - 3,0$ slėgis kritimas degimo kameroje daro nemažą įtaką santykinės traukos dydžiui. Todėl nustatant kameros matmenis, priimama $f_k \geq 3,0$. Tačiau didinant bedimensio ploto dydį daugiau kaip šešis–aštuonis kartus, žymesnio santykinės traukos didėjimo nepastebima.



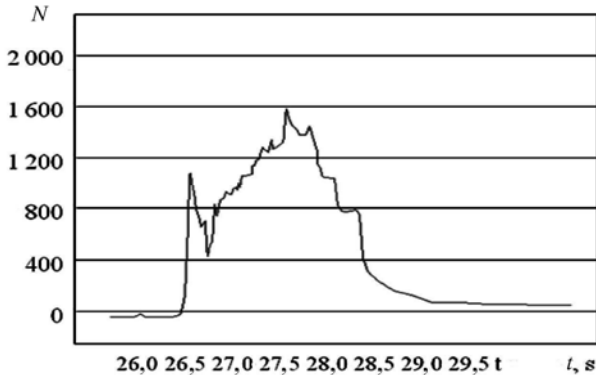
4 pav. Santykinės traukos \bar{P}_s priklausomybė nuo bedimensio ploto f_k

Kietojo kuro variklio tyrimo stendas ir traukos charakteristikų tyrimas

Kuriamojo kietojo kuro raketos variklio traukos jėgai nustatyti naudojamas tenzjutiklis, kurio jautrieji elementai yra tamprūs deformuojamieji kūnai. Paveikti tam tikros jėgos jie sukuria valdymo signalus. Degant kurui tenzjutiklis matuoja raketos kuriamojo kietojo kuro variklio traukos jėgą ir kuro degimo laiką (5 pav.). Gauta traukos jėgos priklausomybė nuo kietojo kuro degimo laiką (5 pav.) pavaizduota 6 pav.



5 pav. Kuriamojo kietojo kuro raketos variklio stendas (a):
1 – tūta; 2 – degimo kamera; 3 – tenzjutiklis; 4 – pagrindas;
kuriamojo kietojo kuro variklio bandymas (b)



6 pav. Traukos jėgos priklausomybės nuo kietojo kuro degimo laiko grafikas

Pasiekta maksimali traukos jėga yra 1 590 N per kuro degimo laiką – 29,0 s. Suminis impulsas apskaičiuojamas taip:

$$I_1 = \frac{\int_0^{\tau} P dt}{m}. \quad (6)$$

Suminis impulsas – 86,59 N/s. Kai trumpas kietojo kuro degimo laikas, pasiekta didelė traukos jėga suteikia didelį raketos pagreitį. Traukos charakteristikos kreivė 6 pav. rodo, kad maksimali traukos jėga, lygi 1 590 N, pasiekama per laikotarpį nuo 26,05 s atskaitos taško, kuriame prasideda intensyvus kietojo kuro degimas, iki 27,5 s atskaitos taško. Nuo 27,5 s atskaitos taško traukos jėga mažėja ir 28,9 s atskaitos taške tampa minimali ir lygi 75 N.

Išvados

Eksperimento metu gautas traukos jėgos priklausomybės nuo kietojo kuro degimo laiko grafikas leidžia nustatyti maksimalią traukos jėgą ir jos kitimą kiekvienu degimo momentu.

Parentant įvairius kietojo kuro mišinius, kiekį ir keičiant tūtos parametrus, galima parinkti optimaliausius raketinio kietojo kuro variklio parametrus. Pailginus kietojo kuro variklio darbo laiką, kai traukos jėga 1 200 N ir daugiau, galima padidinti raketos skridimo atstumą.

Literatūra

1. ВЕРМИШЕВ, А.; ХРИСТОПОВИЧ. Ю. *Основы управления ракетами*. Москва: Воениздат, 1968.
2. ОРЛОВ, Б. В. *Проектирование ракетных и ствольных систем*. Москва: Машиностроение, 1974. 827 с.
3. ВОЛКОВ, Е. Б.; ГОЛОВКОВ, Л. Г. *Жидкостные ракетные двигатели*. Москва, 1970.

THE SOLID FUEL ROCKET MOTOR CONSTRUCTIONS AND THRUST CHARACTERISTIC ANALYSIS

P. Šaulys, A. Fedaravičius, A. Survila

Summary

This article discusses the problem of solid fuel rocket motor constructions. The equation of solid fuel rocket tractive force is examined. The research's equipment, principle of function and results are also discussed.