

## Dujinės terpės parametrø átakos kibirkðtinio iðlydþio spinduolio elektroakustiniams parametrø tyrimas

O. Tumðys, L. Jakevièius, J. Butkus, G. Gudavièius

*Kauno technologijos universitetas  
Srautø diagnostikos laboratorija*

Galingø ðiluminio energetinio árenginio ir plazmatronø aukðtos temperatūros dujø parametrø matavimui aktualūs sprendþiant jø patikimumo ir saugumo, ilgaamþiðkumo, minimalaus kenksmingo poveikio supanèiai aplinkai ir kitus klausimus. Specifinès aukðtos temperatūros dujø srautø matavimo sàlygos reikalauja nestandartinio matavimo priemonio. Iðkylanèio problemø sprendimui pasiūlyta akustinè matavimo sistema, kurioje pritaikytas kibirkðtinio iðlydþio spinduolis [1,2]. Kibirkðtinis iðlydis tarpelektrodiniame kanale formuojamas iðsikraunant aukðtos átampos kondensatoriui. Tokio spinduolio elektroakustiniai parametrai priklauso nuo elektrinès iðkrovos grandinès ir kontroliuojamos terpès parametrø. Kadangi kibirkðtinis iðlydis formuojasi tiriamoje terpėje, tai ðios terpès parametrø pokyèiai tiesiogiai veikia spinduolio darbo rėþimà. Ávertinkime dujø temperatūros T ir slėgio p átakà kibirkðtinio iðlydþio spinduolio elektroakustiniams parametrams.

Kibirkðtinio iðlydþio spinduolio pirmo teigiamo pusperiodþio metu iðspinduliuojama akustinè energija  $W_{ak}$ , remiantis kibirkðtinio iðlydþio dujose ir vandenyje teorinėmis bei empirinėmis iðraiðkomis, apraðoma lygtimi:

$$W_{ak} \approx 0,13(\gamma - 1)^{6/5} c^{-1} p^{-1/2} W; \quad (1)$$

èia  $\gamma$  - dujø adiabatès rodiklis,  $c$  - akustinio signalø sklidimo greitis dujose,  $\rho$  ir  $p$  - atitinkamai dujø tankis ir slėgis,  $W$  - kibirkðtinio iðlydþio tarpelektrodiniam kanalui suteikiama elektrinè energija. Dujø tankio  $\rho$  ir akustinio signalø sklidimo greièio  $c$  priklausomybès nuo slėgio  $p$  ir temperatūros  $T$  nustatomos iðraiðkomis [3]:

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}, \quad (2)$$

$$c = c_0 \sqrt{1 + \gamma_v(T - 273,15)}; \quad (3)$$

èia  $\mu$  - dujø molinè masė,  $R$  - universali dujø konstanta,  $c_0$  - akustinio signalø sklidimo greitis, kai  $T=0^\circ C$ ,  $\gamma_v$  - dujø tūrinio plėtimosi koeficientas. Ávertinus (2) ir (3) iðraiðkas, akustinès energijos priklausomybė  $W_{ak}$  nuo dujø slėgio  $p$  ir temperatūros  $T$  nusakoma lygtimi:

$$W_{ak} \approx 0,13(\gamma - 1)^{6/5} c_0^{-1} R^{1/2} \mu^{-1/2} \times \frac{T}{[1 + \gamma_v(T - 273,15)]^{1/2}} W, \quad (4)$$

Tuomet kibirkðtinio iðlydþio spinduolio generuojamø impulsø akustinès energijos  $W_{ak}$  normuota akustinès energijos normaliomis

sąlygomis ( $T=0^\circ\text{C}$ ,  $p=1\text{ atm.}$ ) atpvilgiu priklausomybė nuo dujų parametrų āgauna 1 pav. pavaizduotā kitimo dėsnā.

$$W = \sqrt{\frac{3,6\gamma - 0,9}{\pi}} \eta^2 (1 - 0,8\eta) U_0^2 \sqrt{\frac{C}{L}} \times \int_0^t \sin^{2n} \left( \frac{t}{(1+\eta)\sqrt{LC}} \right) dt \quad (6)$$

$$n = (14,4\gamma - 36) [\eta(1+\eta)(1-0,8\eta)]^2, \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{\pi A_k d^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}}; \quad (8)$$

1 pav. Kibirkėtiniio iėlydėbio spinduolio generuojamė impulsė akustinė energijos normuota priklausomybė nuo dujų parametrė  $p$  ir  $T$ . Normavimo sąlygos:  $\gamma=1,4$ ,  $p_0=10^5\text{ Pa}$ ,  $\rho_0=1,3\text{ kg/m}^3$ ,  $c_0=331\text{ m/s}$ ,  $T_0=300\text{ K}$ .

ėiuo atveju normuota, āvertinant reikalavimā, kad elektrinio lauko stiprumo  $E$  tarp elektrodė ir dujų slėgio  $p$  santykis nekinta ( $E/p=\text{const.}$ ). Matome, kad akustinė energija  $W_{ak}$  nedaug priklauso nuo kontroliuojamos terpės temperatūros  $T$  (ne didesnis kaip 6 % pokytis, temperatūrai kintant nuo 300 iki 5000 K) ir beveik tiesiėkai didėja, kylant dujų slėgiui  $p$ . Reikia atkreipti dėmesā ā tai, kad reikalaujant  $E/p=\text{const.}$ , dujų slėgio didėjimas kompensuojamas elektrinio lauko tarp elektrodė stiprinimu. Kadangi elektrinio lauko stiprinimo galimybės apriboja konstrukcinės spinduolio sāvėbės, tai spinduolio akustinė energijos  $W_{ak}$  didinimas turi maksimaliā ribā.

Pasinaudojā (4) iėraiėka, āvertinkime spinduolio elektroakustinā naudingumo koeficientā  $\eta_{ak}$ :

$$\eta_{ak} = \frac{W_{ak}}{W} = 0,13(\gamma - 1)^{6/5} c_0^{-1} R^{1/2} \mu^{-1/2} \times \left[ \frac{T}{1 + \gamma \sqrt{(T - 273,15)}} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Iė (5) iėraiėkos matome, kad temperatūrai kintant didelėse ribose (300 - 5000 K), elektroakustinis naudingumo koeficientas  $\eta_{ak}$  keiėiasi nepymiai ir, lyginant su normaliomis sąlygomis, jo pokytis tesudaro 0,2 - 0,7 %.

Iėanalizuokime kibirkėtiniio iėlydėbio tarpelektrodiniam kanalui suteikiamos elektrinės energijos  $W$  priklausomybā nuo kontroliuojamos terpės parametrė  $p$  ir  $T$ . Pirmo teigiamo pusperiodėio metu iėlydėbio tarpelektrodiniam kanalui suteikta elektrinė energija  $W$  priklauso nuo iėkrovos grandinės parametrė  $U_0, L, C$  ir parametro  $\eta$ :

ėia  $C$  - ākraunamo kondensatoriaus talpa,  $U_0$  - ākrovimo ātampa,  $L$  - elektrinės grandinės bendras induktyvumas,  $\eta$  - pirmo teigiamo pusperiodėio metu iėskiriamos energijos dalis,  $\theta$  - pirmo pusperiodėio trukmė,  $A_k$  - kibirkėtinė pastovioji. Dujinės terpės ātakā parametru  $\eta$ , o tuo paėiu ir iėlydėbio tarpelektrodiniam kanalui suteikiamai elektrinei energijai  $W$ , apibrėpia kibirkėtinė pastovioji  $A_k$ . Ji priklauso nuo terpės temperatūros, daleliė koncentracijos, jė jonizacijos laipsnio, atomė jonizacijos potencialo, molekuliė disociacijos ir t.t [4]:

$$A_k = \frac{(1 + \frac{1}{\chi})(1,5K_b T_e + \frac{\xi_d}{3}) + \xi_i}{\mu_e}; \quad (9)$$

ėia  $\chi$  - dujų jonizacijos laipsnis,  $K_b$  - Bolcmano konstanta,  $\xi_d$  - molekuliė disociacijos energija,  $\xi_i$  - jonizacijos energija,  $T_e$  - elektronė temperatūra. Kontroliuojamos terpės cheminė sudėtis ir temperatūra  $T$  apsprendėia molekuliė disociacijos energijā  $\xi_d$ . Jonizacijos energija  $\xi_i$  priklauso nuo dujų rėdies ir, naudojantis smūginės jonizacijos koeficiento  $\alpha$  empyrinės formulės [5] koeficientais  $A$  ir  $B$ , apraėoma iėraiėka:

$$\xi_i = A \cdot B e; \quad (10)$$

ėia  $e$  - elektrono krėvis. Elektronė temperatūra  $T_e$  priklauso nuo elektrinio lauko stiprumo  $E$  ir dujų slėgio  $p$  [6]:

$$T_e = \frac{K_e}{K_b \left(\frac{E}{p}\right)^{2/3}}; \quad (11)$$

ėia  $K_1 = 0,242\text{ V}^{1/3}(\text{mPa})^{2/3}$ . Elektronė judrumas [7]:

$$\mu_e = \frac{K_2}{p}; \quad (12)$$

ėia  $K_2 = 4,4 \cdot 10^3\text{ m}^2\text{Pa}(\text{sV})^{-1}$ . Dujė jonizacijos laipsnis iėreiėkiamas Sacho lygybe [5]:

$$\frac{\chi^2}{1-\chi} = C_1 \frac{g_+}{g_a} \frac{T_e^{3/2}}{N} e^{-\frac{\xi}{K_B T_e}}, \quad (13)$$

kur

$$C_1 = \left[ \frac{2\pi m_e K_B}{h^2} \right]^{3/2} \approx 242 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ K}^{-3/2}; \quad (14)$$

čia  $C_1$  - konstanta,  $g_+$  ir  $g_a$  - jono ir atomo statistiniai svoriai,  $N = p/(K_B T)$  - molekuliø skaièius,  $m_e$  - elektrono masë,  $h$  - Planko konstanta.

Ávertinus (9-14) iðraiðkas ir reikalavimà  $E/p = \text{const.}$ , gauname 2 pav. pavaizduotà energetinio naudingumo koeficiento  $\eta$  normuoto ðio koeficiento normaliomis sàlygomis atþvilgiu priklausomybæ nuo dujø slëgio  $p$  ir temperatûros  $T$ .

3 pav. Kibirkðtinio iðlydþio spinduolio maksimalaus spektrinio slëgio normuota priklausomybë nuo dujø temperatûros  $T$  ir slëgio  $p$ . Normavimo sàlygos:  $p_0 = 10^5$  Pa,  $T_0 = 300$  K,  $r_0 = 1$  m.

Pastebimas spektrinio slëgio  $p(f)_{\text{max}}$  sumaþëjimas, didëjant temperatûrai  $T$ , ir padidëjimas, didinant dujø slëgà  $p$ . Tai ávertinama, pasirenkant spinduolio darbinio dapnio diapazonà.

Impulsiniame dujø pramuðime visada egzistuoja intervalas tarp átampos ájungimo momento ir kibirkðtinio iðlydþio tarpelektrocinio kanalo pramuðimo pradþios - parazitinis vëlinimo laikas  $t_{pv}$  [8]:

$$t_{pv} \approx \frac{0.22 n + 10^3 d^3 \rho C}{\pi r_e^2 \epsilon_0 K_1 U_0^2 + 8\pi d n \sum_{i=1}^n \frac{i}{nd + ikr_e}}; \quad (16)$$

2 pav. Kibirkðtinio iðlydþio pirmo pusperiodþio metu iðsiskirianëios energijos dalies pokyëio priklausomybë nuo dujø slëgio  $p$  ir temperatûros  $T$ . Normavimo sàlygos:  $p_0 = 10^5$  Pa,  $T_0 = 300$  K,  $d = 10^{-3}$  m,  $U_0 = 7,6 \cdot 10^3$  V,  $L_0 = 1,5 \cdot 10^{-5}$  H,  $C_0 = 2 \cdot 10^{-10}$  F.

Pastebimas laipsniðkas koeficiento  $\eta$  maþëjimas, didinant slëgà  $p$ . Priklausomybë nuo temperatûros iðreikþta neþymiai (kinta ne daugiau 4 %, kai  $T$  kinta nuo 300 iki 5000 K). Energetinio naudingumo koeficiento maþëjimà dël slëgio reikia kompensuoti elektrinës iðkrovos grandinës parametø pakeitimu: keisti kondensatoriaus ákrovimo átampà  $U_0$ , talpà  $C$  arba atstumà tarp elektrodø  $d$ . Ðiø parametø kitimas tiesiogiai veikia iðspinduliuojamos akustinës energijos  $W_{\text{ak}}$  kiekà.

Nuo dujinës terpës temperatûros  $T$  ir slëgio  $p$  priklauso ir maksimalus kibirkðtinio iðlydþio spinduolio spektrinis slëgis  $p(f)_{\text{max}}$ :

$$p(f)_{\text{max}} = 0,123 R^{-1/2} \mu^{1/2} r^{-1/3} T^{-1/2} W^{2/3}. \quad (15)$$

Maksimalaus spektrinio slëgio  $p(f)_{\text{max}}$  normuota ðio slëgio normaliomis sàlygomis atþvilgiu priklausomybë nuo dujø parametø  $p$  ir  $T$ , kai kibirkðtinio iðlydþio tarpelektrociniam kanalui suteikiama elektrinë energija  $W$  laikoma pastovia, pavaizduota 3 pav.

èia  $r_e$  - spinduolio elektrodo spindulys,  $\epsilon_0$  - dielektrinë pastovioji,  $k = r_s/r_e$ ,  $r_s$  - elektrodo smailëjimo aukðtis,  $n$  - þingsniø skaièius,  $I$  - dujø vidutinë subadinimo energija. Parazitinis vëlinimo laikas priklauso nuo dujø rûðies ir slëgio. Dujø sudëties apsprendþia vidutinæ subadinimo energijà  $I$ . Dujø slëgis  $p$  átaþoja minimalià kibirkðtinio kanalo pramuðimo átampà  $U_{\text{prmin}}$ , elektrinio lauko stiprumà  $E$  ir atstumo tarp elektrodø  $d$  parinkimà. Bendru atveju gaunama sudëtinga parazitinis vëlinimo laikas  $t_{pv}$  ir dujø parametø tarpusavio priklausomybë. Palaikant pastovius ákraunamo kondensatoriaus virðátampà bei slëgio ir atstumo tarp elektrodø sandaugà didëjant slëgiui parazitinis vëlinimo laikas maþëja.

Ið gautø dujinës terpës parametø átakos kibirkðtinio iðlydþio spinduolio elektroakustiniam parametrui tyrimo rezultatø matyti, kad:

- spinduolio iðspinduliuojamos akustinës energijos  $W_{\text{ak}}$  didëjimà aukðtesniuose slëgiuose ir temperatûrose galima pasiekti, palaikant pastovø santykà  $E/p = \text{const.}$  Tai reikalauja didesniø energetiniø sànaudø, sudëtingesnës keitiklio ir elektrinës iðkrovos grandinës konstrukcijos;



DOI: 10.5755/j01.u.26.1.7842