

Dujinės terpės parametrø átakos kibirkøtiniø 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. Specifinës aukðtos temperatūros dujø srautø matavimo sàlygos reikalauja nestandartiniø matavimo priemoniø. Iðkylanèio problemø sprendimui pasiūlyta akustinë matavimo sistema, kurioje pritaikytas kibirkøtiniø iðlydþio spinduolis [1,2]. Kibirkøtinis iðlydis tarpelektrodiniame kanale formuojamas iðsikraunant aukðtos átampos kondensatoriui. Tokio spinduolio elektroakustiniai parametrai priklauso nuo elektrinës iðkrovos grandinës ir kontroliuojamos terpës parametrø. Kadangi kibirkøtinis iðlydis formuojasi tiriamoje terpėje, tai ðios terpës parametrø pokyèiai tiesiogiai veikia spinduolio darbo rëþimà. Ávertinkime dujø temperatūros T ir slëgio p átakà kibirkøtiniø iðlydþio spinduolio elektroakustiniams parametrams.

Kibirkøtiniø iðlydþio spinduolio pirmo teigiamo pusperiodþio metu iðspinduliuojama akustinë energija W_{ak} , remiantis kibirkøtiniø iðlydþio dujose ir vandenyje teorinëmis bei empirinëmis iðraiðkomis, apraðoma lygtimi:

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

èia γ - dujø adiabatës rodiklis, c - akustiniø signalø sklidimo greitis dujose, ρ ir p - atitinkamai dujø tankis ir slëgis, W - kibirkøtiniø iðlydþio tarpelektrodiniam kanalui suteikiama elektrinë energija. Dujø tankio ρ ir akustiniø signalø sklidimo greièio c priklausomybës nuo slëgio 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 μ - dujø molinë masë, R - universali dujø konstanta, c_0 - akustiniø signalø sklidimo greitis, kai $T=0^\circ C$, γ_v - dujø tūrinio plëtimosi koeficientas. Ávertinus (2) ir (3) iðraiðkas, akustinës energijos priklausomybë W_{ak} nuo dujø slëgio 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 kibirkøtiniø iðlydþio spinduolio generuojamø impulsø akustinës energijos W_{ak} normuota akustinës energijos normaliomis

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

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

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

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

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 akustinės energijos W_{ak} didinimas turi maksimaliā ribā.

Pasinaudojā (4) iėraiėka, āvertinkime spinduolio elektroakustinā naudingumo koeficientā η_{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 η_{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 η :

ėia C - ākraunamo kondensatoriaus talpa, U_0 - ākrovimo ātampa, L - elektrinės grandinės bendras induktyvumas, η - pirmo teigiamo pusperiodėio metu iėskiriamos energijos dalis, θ - pirmo pusperiodėio trukmė, A_k - kibirkėtinė pastovioji. Dujinės terpės ātakā parametrai η , 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 χ - dujų jonizacijos laipsnis, K_b - Bolcmano konstanta, ξ_d - molekuliė disociacijos energija, ξ_i - jonizacijos energija, T_e - elektronė temperatūra. Kontroliuojamos terpės cheminė sudėtis ir temperatūra T apsprendėia molekuliė disociacijos energijā ξ_d . Jonizacijos energija ξ_i priklauso nuo dujų rėdies ir, naudojantis smūginės jonizacijos koeficiento α 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 η 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: $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $r_0 = 1 \text{ m}$.

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 tarpelektrodo kanalo pramuðimo pradþios - parazitinis vëlinimo laikas t_{pv} [8]:

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

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

Pastebimas laipsniðkas koeficiento η maþëjimas, didinant slëgà p . Priklausomybë nuo temperatûros iðreikõta 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_{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 tarpelektrodo kanalui suteikiama elektrinë energija W laikoma pastovia, pavaizduota 3 pav.

èia r_e - spinduolio elektrodo spindulys, ϵ_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 sudëtis apsprendþia vidutinæ subadinimo energijà I . Dujø slëgis p átaþoja minimalià kibirkðtinio kanalo pramuðimo átampà U_{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_{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;

