

# Likusios ant ištraukiamo iš skysčio vertikalalaus paviršiaus plėvelės tyrimas

**Jurij Tonkonogij,**

**Arūnas Stankevičius,**

**Antanas Pedišius**

*Lietuvos energetikos instituto  
Šilumos įrengimų tyrimo ir bandymų  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas  
El. paštas: testlab@mail.lei.lt*

Pateikti likusios ant ištraukiamo iš skysčio vertikalalaus paviršiaus plėvelės eksperimentinio tyrimo rezultatai. Gauti duomenys panaudoti, įvertinant oro tūrio suminės neapibrėžties sandą, kuris susijęs su skysčio plėvele, naudojant etaloninį varpo tipo įrenginį.

**Raktažodžiai:** skysčio plėvelė, tekėjimas ant vertikalalaus paviršiaus, varpo tipo įrenginys, oro tūrio neapibrėžtis

## 1. ĮVADAS

Oro bei dujų tūrio ir srauto matavimai užima svarbią vietą Lietuvos energetikos ūkyje, nes jie lemia gamtinių dujų vartojimo apskaitos ir emisijų iš energetikos objektų kaminų arba kitų šaltinių vertinimo tikslumą.

Daugelyje Europos šalių, taip pat ir Lietuvoje, naudojami etaloniniai varpo tipo įrenginiai [1], užtikrinantys aukščiausią oro tūrio ir srauto matavimo tikslumą.

Šiuose įrenginiuose tiksliai žinomo tūrio cilindrinis su vienu dugnu rezervuaras – varpas, leisdamasis žemyn į baką su sandarinančiuoju skysčiu, pro vamzdį išstumia orą.

Dabar pasaulyje geriausių šio tipo įrenginių tūrio ir srauto matavimo galimybė (GMG) siekia  $\pm 0,06\%$ . Lietuvos energetikos institute sukurto įrenginio GMG yra  $\pm 0,13\%$ . Tačiau didėjantys reikalavimai matavimo tikslumui, tarptautiniams lyginimams ir sieties garantavimui verčia mažinti GMG iki reikšmių, mažesnių nei  $\pm 0,10\%$ .

Oro tūrio nustatymo neapibrėžties, naudojant varpo tipo įrenginį, analizė pateikta [1–3]. Vienas veiksnių, turintis didelę ir matavimo metu kintančią įtaką tikslumui, yra sandarinančiojo skysčio plėvelės ant ištraukiamo iš skysčio varpo paviršiaus formavimasis ir laipsniškas jos nutekėjimas. Šio sando įtaka ypač reikšminga tobuliems varpo įrenginiams, kurių GMG yra  $\leq \pm 0,1\%$ . Akivaizdu, kad plėvelės tūris visiškai priklauso nuo jos storio. Nustatant oro tūrio neapibrėžtį, reikia turėti omenyje, kad plėvelės storis kinta tiek pagal varpo aukštį, tiek laiką, o tai neįvertinta [2]. Šis veiksnys priklauso nuo skysčio fizikinių savybių, paviršiaus ištraukimo iš skysčio greičio, išlaikymo iškeltoje padėtyje laiko ir kt. Šaltinių [4–9] duomenys apie įvairių veiksnių poveikį plėvelės storiui nepakankamai suderinti tarpusavyje. Duomenų apie plėvelės storio kitimą po paviršiaus ištrauki-

mo nėra. Literatūroje nepakankamai išaiškintas plėvelės įtakos matavimo neapibrėžčiai mechanizmas.

Pačius pirmuosius eksperimentinius skysčio plėvelės ant vertikalalaus paviršiaus, kuris ištraukiamas iš nejudančio skysčio, tyrimus atliko F. C. Morey [4].

Teorinę problemos analizę pirmieji atliko L. Landau ir V. Levich [5, 6]. Jie pateikė formules vidutiniam pagal aukštį plėvelės storiui  $\bar{\delta}$  skaičiuoti.

Kai ištraukto paviršiaus aukštis virš skysčio lygio  $h \rightarrow \infty$ , arba kai ištraukimo greitis  $v \ll \frac{\sigma}{\mu}$ , t. y.  $\frac{v\mu}{\sigma} \ll 1$ ,

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_\infty &= 0,93 \frac{(\mu v)^{2/3}}{(\rho g)^{1/2} \sigma^{1/6}} = \\ &= 0,93 \cdot \left( \frac{\mu v}{\rho g} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{\mu v}{\sigma} \right)^{1/6}; \end{aligned} \quad (1)$$

čia  $v$  – ištraukimo greitis;  $\mu$ ,  $\rho$  ir  $\sigma$  – atitinkamai skysčio dinaminė klampa, tankis ir paviršiaus įtempimas.

$$\text{Kai } \frac{v\mu}{\sigma} \gg 1,$$

$$\bar{\delta} \equiv \left( \frac{\mu v}{\rho g} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Pavartojus B. Deriagino [7] pasiūlytus nedimensinius kintamuosius

$$\bar{\varepsilon} \equiv \frac{\bar{\delta}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}} \quad (3)$$

ir

$$x \equiv \left( \frac{\mu v}{\sigma} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

(1) ir (2) formules galima atitinkamai pateikti taip:

$$\bar{\varepsilon} = 0,93x^2 \quad (1a)$$

ir

$$\bar{\varepsilon} = x^{3/2}. \quad (2a)$$

Formulių  $\bar{\delta}$  skaičiavimui, esant tarpinėms kompleksų  $\frac{\nu\mu}{\sigma}$  reikšmėms, [5, 6] darbuose nepateikta.

B. Deriagino atlikti tiek teoriniai [7], tiek eksperimentiniai [8] (kartu su A. Titievska) tyrimai. Pasiūlyta bendroji formulė  $\bar{\varepsilon}$  apskaičiuoti:

$$\bar{\varepsilon} = x^{2/3} \varphi(x). \quad (5)$$

Kai  $x \rightarrow 0$ ,  $\varphi(x) \rightarrow kx^{1/2}$ ,  $k = 0,94$ ; kai  $x \rightarrow \infty$ ,  $\varphi(x) \rightarrow 1$ .

[vertinant plėvelės profilį,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\delta}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}} = x^{3/2} \cdot \varphi(x) \cdot [1 - 1/3 \varphi^2(x)]. \quad (6)$$

Nustatyti ribiniai dėsniai:

kai  $x \rightarrow 0$ ,

$$\bar{\delta} = 0,94 \frac{(\mu\nu)^{2/3}}{(\rho g)^{1/2} \sigma^{1/6}} \left[ 1 - 0,293 \left( \frac{\mu\nu}{\sigma} \right)^{1/3} \right] \quad (7)$$

arba

$$\bar{\varepsilon} = 0,94 \left( \frac{\mu\nu}{\sigma} \right)^{2/3} \left[ 1 - 0,293 \left( \frac{\mu\nu}{\sigma} \right)^{1/3} \right]; \quad (7a)$$

kai  $x \rightarrow \infty$ ,

$$\bar{\delta} = 2/3 \left( \frac{\nu \cdot \nu}{g} \right)^{1/2} \quad (8)$$

arba

$$\bar{\varepsilon} = 2/3 \cdot x^{3/2}. \quad (8a)$$

(7a) ir (8a) formulės yra suderintos ribiniame taške  $x = 1,137$ . Kai  $x \leq 1,137$ , galima naudoti (7a) formulę; kai  $x \geq 1,137$ , naudojama (8a) formulė.

Pagal vėlesnius A. J. W. Smitho tyrimus [9],

$$\bar{\delta} = 2/3 \left( \frac{\nu \cdot \nu}{g} \right)^{0,5} \quad (9)$$

arba

$$\bar{\varepsilon} = 2/3 \cdot x^{3/2}. \quad (9a)$$

Pastaroji formulė sutampa su (8a) formule [7, 8]. Jokių apribojimų pagal  $\bar{\varepsilon}$  arba kompleksų  $\frac{\nu\mu}{\sigma}$  reikšmes nenustatyta.

Aptartų darbų rezultatai parodyti 1 pav. Juos analizuojant, galima padaryti tokias išvadas:

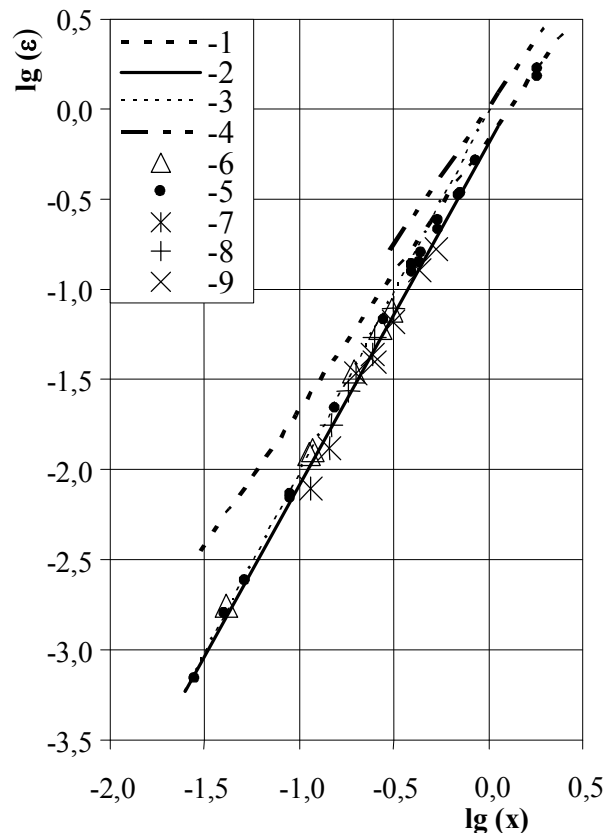
1. Skaičiavimų rezultatai pagal skirtingų autorių teorines priklausomybes ženkliai skiriasi. Esant mažoms  $x$  reikšmėms, kurios būdingos varpo tipo įrenginiams, rezultatai pagal (1a), (2a) [5, 6] ir (7a), (8a) [7, 8] formules yra labai artimi, rezultatai pagal (9a) [9] formulę yra keletą kartų didesni (žr. 1 lentelę, kurioje pateikti  $\varepsilon$  verčių pagal Landau–Levicho ir Smitho, viena vertus, ir pagal Deriagino, kita vertus, santykiai). Esant didelėms  $x$  reikšmėms rezultatai pagal (1a) ir (2a) formules 5% didesni už rezultatus pagal (7a), (8a) ir (9a) formules.

2. Eksperimentiniai duomenys geriausiai sutampa su skaičiavimo rezultatais pagal (7a) ir (8a) formules [7, 8].

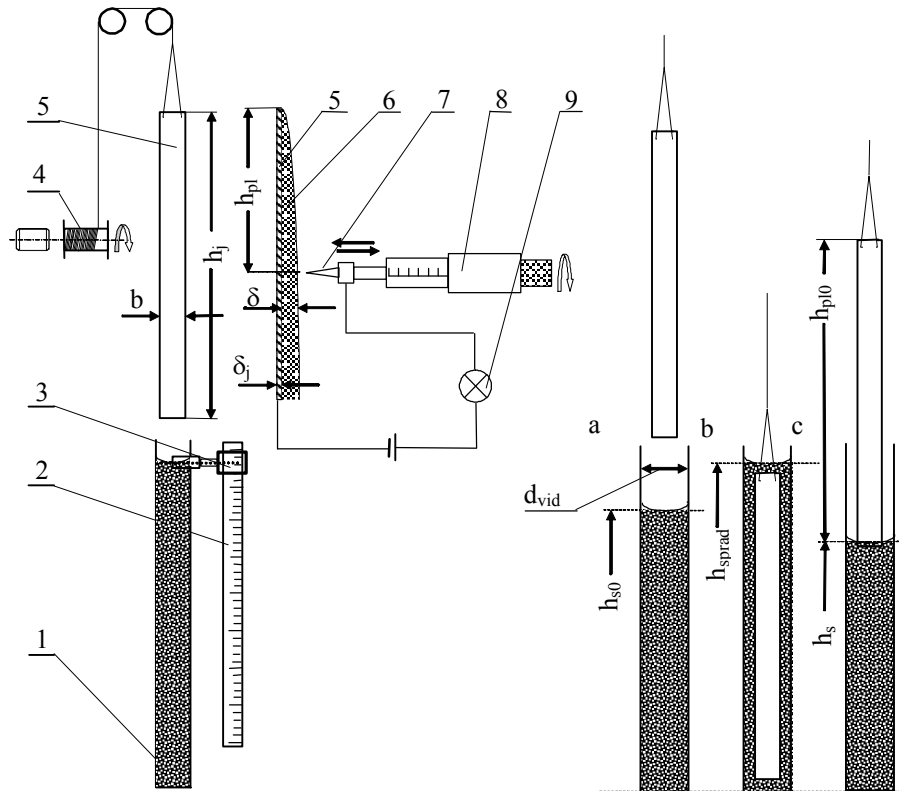
3. NIST (JAV) rekomendacijos [2] plėvelės ant varpo paviršiaus storio skaičiavimui pagal (9a) formulę [9] nėra pakankamai pagrįstos.

1 lentelė. Teorinių formulių lyginimas

Formulės	x	$\varepsilon/\varepsilon_{Der}$
Landau–Levicho	0,025	1,00
	1,137	1,48
A. J. W. Smitho	0,025	4,52
	1,137	1,00



1 pav. Apibendrinta priklausomybė skysčio plėvelės storiui. 1 – pagal [8] teorija, kai  $x \geq 1,137$ , ir [9]; 2 – teorija [8], kai  $x \leq 1,137$ ; 3 – teorija [6], kai  $\mu\nu/\sigma \ll 1$ ; 4 – teorija [6], kai  $\mu\nu/\sigma \gg 1$ ; 5 – eksperimentai [6]; 6 – eksperimentai [4]; 7, 8, 9 – autorių eksperimentai, atitinkamai TA/US, TA, DC (žymėjimus žr. 1 lent.)



**2 pav.** Tyrimų įrangos schema: 1 – stiklinis cilindras su bandomuoju skystėju; 2 – elektroninė liniuotė; 3 – liniuotės nuskaitymo galvutė su optiniu vizyru; 4 – elektros variklis su keičiamu būgnu; 5 – tiriamoji juosta; 6 – skysčio plėvelė ant juostos; 7 – metalinė adata; 8 – mikrometrinis sraigtas; 9 – indikacinė lemputė. Skysčio lygis: a – prieš plieninės juostos panardinimą į skystį; b – kai juosta panardinta į skystį; c – kai juosta ištraukta iš skysčio

Visi žinomi rezultatai skirti tik vidutiniam pagal aukštį plėvelės storiui ir tik paviršiaus ištraukimo iš skysčio metu arba iškart po ištraukimo. Duomenų apie plėvelės storio pasiskirstymą pagal aukštį ir jo kitimą laike po ištraukimo literatūroje nėra.

Toliau aprašytų tyrimų tikslas – gauti patikimus duomenis apie skysčio plėvelės storio pasiskirstymą pagal aukštį ir laike ir taikyti šiuos duomenis oro tūrio nepibrėžties skaičiavimui, naudojant varpo tipo įrenginį.

## 2. TYRIMŲ ĮRANGA IR METODIKA

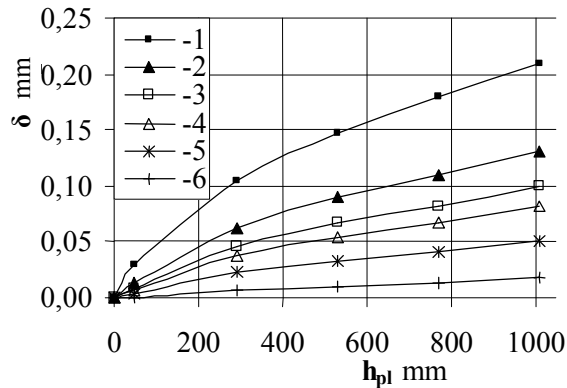
Eksperimentiniams tyrimams panaudotos įrangos schema parodyta 2 pav. Tirta skysčio plėvelė buvo sudaroma ant nerūdijančio plieno juostos (5), kurios matmenys  $h_j \times b \times \delta_j$  buvo  $1050 \times 19 \times 2$  mm.

Pradžioje juosta buvo visiškai nardinama į stiklinį cilindrą (1) su tiriamu skystėju (2 pav., b), o paskui ištraukiama. Juosta buvo pakabinta ant plono siūlo, kuris buvo vyniojamas ant besisukančio būgno (4) su elektros pavara. Traukimo greitis buvo reguliuojamas, keičiant besisukančio būgno skersmenį. Iš viso buvo panaudoti 4 būgnai, kurie užtikrino traukimo greitį 0,6; 1,16; 3 ir 5,8 cm/s. Po ištraukimo juosta buvo paliekama pakabinta virš atviro cilindro, ir nutekantis nuo juostos skystis buvo surenkamas cilindre, didėjant skysčio

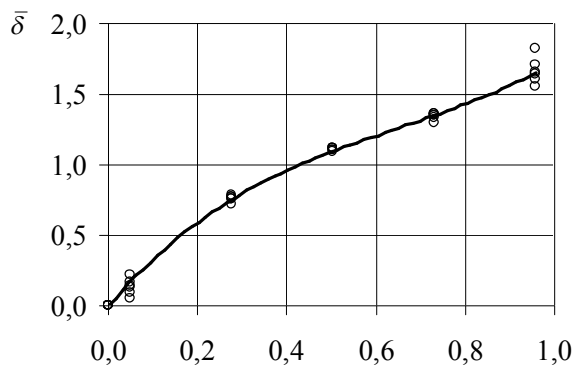
lygiui. Tyrimų metu juosta buvo arba visiškai ištraukiama iš skysčio cilindre (1 pav., a), arba maža apatinė juostos dalis buvo paliekama skystyje (2 pav., c). Cilindras (1) buvo kalibruotas, ir jo vidinis skersmuo  $\delta_{vid}$  buvo tiksliai žinomas.

Vidutinis pagal aukštį plėvelės storis buvo nustatomas pagal skysčio cilindre lygio ir atitinkamai tūrio kitimą. Skysčio lygis buvo matuojamas elektrone liniuote (2) su slystančia nuskaitymo galvute (3). Galvutė buvo įrengta su optiniu vizyru, kuris matavimo metu buvo sutapdinamas su skysčio lygiu. Elektroninės liniuotės matavimo ribos 0–1250 mm, skiriamoji geba 5  $\mu$ m. Momentinis plėvelės storis buvo apskaičiuojamas kaip pradinio skysčio cilindre tūrio (atitinkančio pradiniam lygiui  $h_{sprad}$  – 2 pav., b) schema ir momentinio skysčio cilindre tūrio (atitinkančio einamajam lygiui  $h_s$  – 2 pav., c) bei sausos juostos tūrio sumos skirtumas.

Vietinio plėvelės storio reikšmės išilgai juostos buvo matuojamos mikrometriniu sraigtu (8) su skiriamąja geba 0,01 mm, kurio gale buvo įrengta adata (7). Pradžioje adata buvo suliečiama su išoriniu plėvelės paviršiumi. Sąlyčio momentas buvo gerai stebimas vizualiai. Toliau adata buvo artinama prie juostos paviršiaus iki sąlyčio su metaline juosta, kuris buvo nustatomas elektriniu būdu pagal indikacinę lemputę (9). Plėvelės storis buvo apskaičiuojamas kaip mikrometrinio sraigto pradinio ir galutinio rodmenų skirtumas.



3 pav. DC skysčio plėvelės storio pasiskirstymas pagal aukštį esant skirtingiems laiko  $t$  momentams: 1 – 250; 2 – 500; 3 – 750; 4 – 1000; 5 – 2000; 6 – 10000 s



4 pav. DC skysčio plėvelės storio nedimensinis pasiskirstymas skirtingu laiko momentu (žymėjimai kaip 3 pav.)

2 lentelė. Tiriomojo skysčio fizikinės savybės (20°C)

Skystis, jo žymėjimas	Tankis kg/m <sup>3</sup>	Dinaminė klampa mPa×s
Dow-Corning-200 (DC)	0,9637	54,701
Transformatorinė alyva (TA)	0,8863	17,092
80% transformatorinės alyvos + 20% tspirito (TA/US)	0,8726	9,0764

Tyrimai buvo atlikti su trimis skysčiais, kurių fizikinės savybės pateiktos 2 lentelėje.

### 3. TYRIMO REZULTATAI

Eksperimentiniai duomenys apie pradinį (iškart ištraukus juosta) visų trijų tipų skysčių (2 lentelė) plėvelės storį priklausomai nuo ištraukimo greičio ir fizikinių savybių apibendrintai parodyti 1 pav. Šie duomenys, kaip ir eksperimentiniai duomenys [4] ir [7], gerai sutampa su (7a) priklausomybe. Todėl, skaičiuojant vidutinį pagal aukštį skysčio plėvelės storį paviršiaus traukimo metu arba iškart po ištraukimo, galima naudoti (7a) ir (8a) [8] priklausomybes.

Plėvelės storio pasiskirstymas pagal aukštį po juostos ištraukimo buvo tyrinėtas, naudojant tik Dow-Corn-

ing-200 skystį. Naudojant kitus skysčius, plėvelės storis dėl mažos klamos buvo per mažas ir jo matavimo tikslumas nepakankamas. Juostos traukimo greitis  $v = 1,16$  cm/s. Matavimo rezultatai esant įvairiems laiko momentams parodyti 3 pav.

Visas kreives esant skirtingiems laiko momentams galima apibendrinti viena kreive, įtraukiant nedimensinius kintamuosius  $\bar{\delta}$  (santykinis plėvelės storis) ir  $\bar{h}$  (santykinis plėvelės aukštis):

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_{\text{vid}}}, \quad (10)$$

$$\bar{h} = \frac{h_{\text{pl}}}{h_{\text{pl0}}}, \quad (11)$$

čia  $\delta$  ir  $\delta_{\text{vid}}$  – momentinė vietinė ir vidutinė pagal aukštį plėvelės storio reikšmės,  $h_{\text{pl}}$  ir  $h_{\text{pl0}}$  – vietinis ir visas plėvelės aukštis (žr. 2 pav.).

Tokio apibendrinimo rezultatai pateikti 4 pav.

Matyti, kad kreivė (4 pav.) turi perlinkį. Toks kreivės pobūdis paaiškinamas tuo, kad esant mažoms  $\bar{h}$  reikšmėms didesnę įtaką turi trinties jėgos, esant didesnėms  $\bar{h}$  reikšmėms – paviršiaus įtempimo jėgos. Nedidelis sisteminis taškų išsisluoksniavimas stebimas arti kraštinių reikšmių  $\bar{h} = 0$  ir  $\bar{h} = 1$ . Nepaisant to, 4 pav. kreivė pakankamai gerai aprašoma 3-iojo laipsnio polinomu:

$$\bar{\delta} = 2,086 \bar{h}^3 - 4,037 \bar{h}^2 + 3,68 \bar{h}. \quad (12)$$

Eksperimentiniai duomenys apie tirtų skysčių vidutinio plėvelės storio  $\delta_{\text{vid}}$  pasiskirstymą laike parodyti 5 pav. Duomenys kiekvienam iš trijų DC, TA ir TA/US tyrinėtų skysčių gerai aprašomi atitinkamai (13)–(15) lygtimis:

$$\delta_{\text{vid}} = 1,399t^{-0,53} \text{ mm}, \quad (13)$$

$$\delta_{\text{vid}} = 0,300t^{-0,41} \text{ mm}, \quad (14)$$

$$\delta_{\text{vid}} = 0,202t^{-0,33} \text{ mm}. \quad (15)$$

Laiko  $t$  dimensija – s.

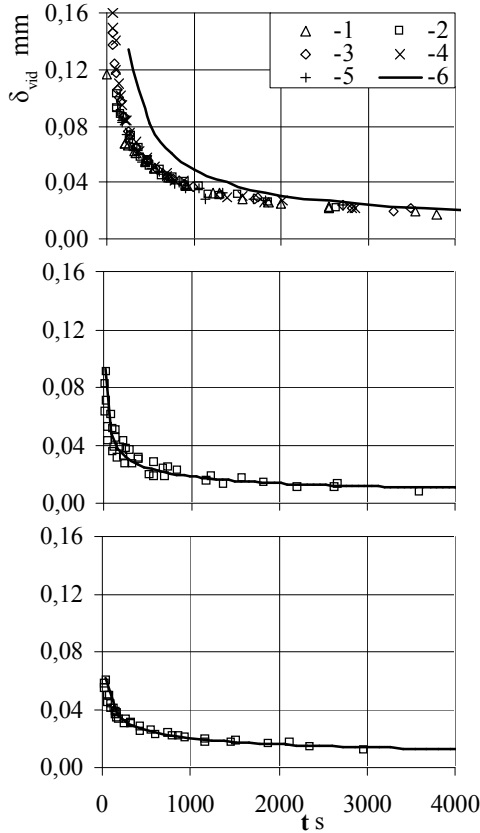
Analizuojant visus eksperimentinius duomenis, galima konstatuoti:

1. Nuo ištraukto kartu su juosta vertikalios paviršiaus skystis teka ilgai – iki keleto valandų.
2. Mažinant skysčio klampą, plėvelė plonėja.
3. Netgi praėjus ilgam laikui skystis visiškai nuteka ir ant varpo paviršiaus pasilieka plona, 0,01 mm eilės storio, plėvelė. Įtikinamiausia šios plėvelės susidarymo priežastis – adhezija.

Gauti rezultatai panaudoti oro tūrio neapibrėžties, naudojant varpo tipo įrenginius, analizei.

### 4. PLĖVELIŲ ANT VARPO PAVIRŠIAUS ĮTAKA ORO TŪRIO NEAPIBRĖŽČIAI

Varpui besileidžiant plėvelių ant jo vidinio ir išorinio paviršių tūris mažėja dėl plėvelių tiek storio, tiek aukš-



5 pav. Vidutinio plėvelės storio ant juostos pasiskirstymas laike. 1–5 – pagal tūrio matavimą, atitinkamai  $V = 0,6; 1,16; 3; 5,8$  cm/s; 6 – pagal tiesioginį plėvelės storio matavimą; a – DC; b – TA; c – TA/US

čio sumažėjimo. Atitinkamai didėja sandarinančiojo skysčio bako tūris ir lygis. Skysčio plėvelių ant varpo paviršiaus kitimo schema parodyta 6 pav.

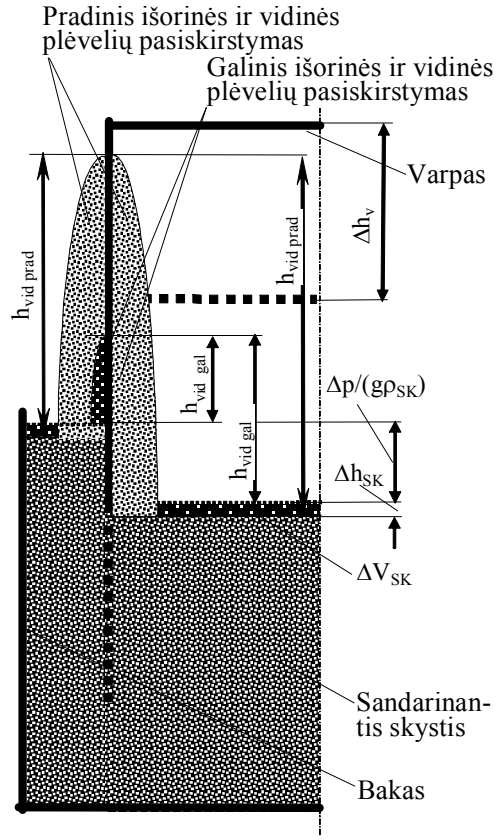
Dėl skysčio plėvelių buvimo, jų nutekėjimo, storio ir aukščio kitimo susikuria papildomas oro tūris, kuris, jei nevertinamas kaip pataisa, didina matuojamo oro tūrio suminę neapibrėžtį. Papildomas išplėstinės oro tūrio neapibrėžties sandas  $U(V)_{pl}$  dėl plėvelių nustatomas kaip trijų tūrių balansų rezultatas:

$$U(V)_{pl} = \Delta V_{sk} - (\Delta V_1 + \Delta V_2); \quad (16)$$

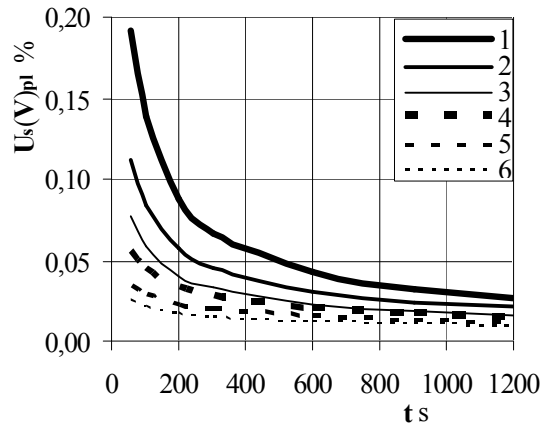
čia  $\Delta V_{sk}$  – sandarinančiojo skysčio po varpu tūrio didėjimas;  $\Delta V_1$  – plėvelės ant vidinio varpo paviršiaus dalies, kuri panardinama kartu su varpu, tūris;  $\Delta V_2$  – nepanardinamos plėvelės dalies ant vidinio varpo paviršiaus tūrio sumažėjimas dėl plėvelės nutekėjimo.

Nustatant plėvelės tūrį bet kuriuo laiko momentu per visą aukštį, naudojamos (13)–(15) lygtys. Nustatant tūrius  $\Delta V_1$  ir  $\Delta V_2$  reikia žinoti vidutinį plėvelės storį jos ruože nuo aukščio  $h_1$  iki aukščio  $h_2$ . Ji nustatoma kaip (12) lygties integravimo rezultatas:

$$\bar{\delta}_{vid,h_1,h_2} = [1,8402(\bar{h}_2^2 - \bar{h}_1^2) - 1,3455(\bar{h}_2^3 - \bar{h}_1^3) + 0,52135(\bar{h}_2^4 - \bar{h}_1^4)]/(\bar{h}_1 - \bar{h}_2). \quad (17)$$



6 pav. Skysčio plėvelių ant varpo paviršiaus kitimo schema



7 pav. Išplėstinės oro tūrio neapibrėžties priklausomybė nuo varpo išlaikymo jį iškelus laiko. 1, 2, 3 – DC, praleidžiamas oro tūris atitinkamai 0,1; 0,2; 0,3 m<sup>3</sup>, 4, 5, 6 – TA/US, 0,1; 0,2; 0,3 m<sup>3</sup>

Neapibrėžties  $U(V)_{pl}$  skaičiavimo rezultatai varpai, kurio skersmuo 0,63 m ir visas poslinkis 1 m, priklauso nuo išstumto oro tūrio ir varpo išlaikymo jį pakėlus laiko prieš pradedant matavimus, kai srautas 1 m<sup>3</sup>/h ir esant dviems skysčio tipams – DC ir TA/US, pavaizduoti 7 pav.

Neapibrėžtis  $U(V)_{pl}$  visada teigiama ir didėja, didinant skysčio klampą, mažinant varpo išlaikymo jį pakėlus laiką ir mažinant išstumto oro tūrį. Esant nepalankioms sąlygoms ji siekia 0,2%, o tai atitinka rezultatus [9]. Palankiausiomis sąlygomis neapibrėžtis mažėja iki (0,01–0,02)%.

## 5. IŠVADOS

1. Pateikti likusios ant ištraukiamo iš skysčio vertikalios paviršiaus plėvelės eksperimentinio tyrimo rezultatai. Ištirta plėvelės storio priklausomybė nuo skysčio fizikinių savybių, ištraukimo greičio ir išlaikymo po ištraukimo laiko, taip pat plėvelės storio pasiskirstymas pagal aukštį.

2. Pagal gautus rezultatus įvertinta susijusi su skysčio plėvele oro tūrio neapibrėžtis, naudojant etalonių varpo tipo įrenginį. Neapibrėžtis visada teigiama ir didėja, skysčio klampai didėjant, mažinant varpo išlaikymo po ištraukimo laiką ir mažinant išstumiamo oro tūrį.

3. Esant nepalankioms sąlygoms ši neapibrėžtis lygi 0,2%.

Gauta 2007 01 30

Parengta 2007 02 28

## Literatūra

1. Tonkonogij J., Stankevičius A., Pedišius A. Oro ir tūrio srauto vienetų atkūrimo etalonių varpo tipo įrenginių neapibrėžtys. Analizė bei tobulinimas // Matavimai. Kaunas: Technologija, 2003. Nr. 4(28). P. 7–10.
2. Piston prover and bell prover gas flow facilities. NIST Calibration services for gas flow meters. NIST special publication 250-49, August 1998. 41 p.
3. Тонконогий Ю., Пядишюс А., Станкявичюс А. Совершенствование эталонных колокольных установок для воспроизведения единиц объема и расхода воздуха // Промышленная теплотехника / Industrial heat engineering. Supplement. Kiev, Ukraine. 2003. Vol. 25. N 4. P. 483–485.
4. Morey F. C. // J. Res. Nat. Bureau Stand. 1940. Vol. 25. P. 385.
5. Landau L., Levich V. // Acta Physicochimica URSS. 1942. Vol. 17. P. 41.
6. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Москва: Физматгиз, 1959. 699 с.
7. Дерягин Б. В. // ДАН СССР. 1943. Т. 39. С. 11.
8. Дерягин Б., Титиевская А. Экспериментальное изучение толщины слоя жидкости, оставляемого на твердой стенке позади отступающего мениска // ДАН СССР. 1945. Т. 50. С. 307–310.
9. Smith A. J. W. The effect of oil films on the performance of bell provers // Int. J. Mech. Sci. 1976. Vol. 18. P. 135–143.

**Jurij Tonkonogij, Arūnas Stankevičius, Antanas Pedišius**

## INVESTIGATION OF FILM ON VERTICAL PLATE DRAWN FROM LIQUID

### Summary

Results of experimental investigation of a film on a vertical plate drawn from oil tank are presented. The results are used to evaluate the influence of the liquid film on the uncertainty of air volume while using a bell-type prover.

**Key words:** liquid film, flow on vertical plate, bell type prover, air volume uncertainty

**Юрий Тонконогий, Арунас Станкявичюс, Антанас Пядишюс**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНКИ НА ВЫТЯГИВАЕМОЙ ИЗ ЖИДКОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### Резюме

В статье изложены результаты экспериментального исследования пленки на вытягиваемой из жидкости вертикальной поверхности. Полученные результаты использованы для анализа связанной с пленкой неопределенности объема воздуха при использовании колокольной установки.

**Ключевые слова:** пленка масла, течение на вертикальной поверхности, колокольная установка, неопределенность объема воздуха