

# Šilumos atidavimas sraigtinių kanalų pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje oro sraute

**Povilas Poškas,**

**Vytautas Šimonis**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduolinės inžinerijos problemų  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas  
El. paštas: simonis@mail.lei.lt*

Darbe pateikti stačiakampio skerspjūvio sraigtinių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių vietinio šilumos atidavimo pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje eksperimentinio tyrimo rezultatai, jų analizė ir apibendrinimas. Tyrimai atlikti oro sraute plačiame režiminių ( $Re = 10^3 - 4 \cdot 10^5$ ) ir geometrinių ( $D/h = 5 - 90$ ,  $b/h = 2 - 20$ ) parametrų intervale, esant vienpusiam tik išgaubto arba tik įgaubto paviršiaus kaitinimui.

Tyrimai parodė, kad pagal sraigtinių kanalų ilgį išgaubto paviršiaus šilumos atidavimas mažėja, o įgaubto paviršiaus didėja artėdami prie stabilizuotų reikšmių, kurios didžiausio kreivumo kanale ( $D/h = 5,5$ ) siekia  $-50\%$  išgaubtam paviršiui ir  $+60\%$  įgaubtam paviršiui nuo tiesaus plokščio kanalo šilumos atidavimo. Lyginant su tiesiu plokščiu kanalu, mažėjant sraigtinių kanalų kreivumui (didėjant  $D/h$ ), abiejų paviršių šilumos atidavimo intensyvumas mažėja. Taip pat nustatyta, kad šilumos atidavimo stabilizacija ant išgaubto paviršiaus pasireiškia vėliau negu ant įgaubto paviršiaus ar tiesiame plokščiaame kanale.

Gautos apibendrinančios priklausomybės, nusakanti sraigtinių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių šilumos atidavimo pasikeitimą pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje, lyginant su stabilizuotu šilumos atidavimu.

**Raktažodžiai:** šilumos atidavimas, sraigtinis kanalas, išgaubta sienelė (paviršius), įgaubta sienelė (paviršius), pradinė šiluminės stabilizacijos dalis

## 1. ĮVADAS

Įvairaus skerspjūvio kreivi kanalai (tarp jų ir sraigtiniai) ar jų dalys plačiai aptinkami įvairiuose šilumokaičiuose, aušinimo ar šildymo sistemose, branduoliniuose reaktoriuose ir pan. Užsukti srautai, veikiami išcentrinųjų jėgų, skiriasi nuo tiesialinijinių srautų, ir dažnai, srauto užsukimas leidžia padidinti šilumos ir masės pernešimą, todėl neretai yra naudojamas įvairiuose energetiniuose įrenginiuose.

Nepaisant nemažai atliktų darbų su išcentrinųjų jėgų veikiama srautais kreivuose kanaluose ar ant kreivų paviršių, dauguma jų nagrinėja suvidurkintas pagal perimetrą ir (arba) pagal ilgį šiluminės bei hidrodinaminės charakteristikas. Tačiau atskiri tyrimai rodo, kad išgaubto ir įgaubto paviršiaus šilumos atidavimas ir trintis yra kiekybiškai ir kokybiškai skirtingi.

Šiame darbe, tęsiant mūsų ankstesnius vietinio šilumos atidavimo ir hidrodinamikos tyrimus kreivuose kanaluose, pateikti stačiakampio skerspjūvio sraigtinių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių vietinio šilumos atidavimo pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje eksperimentinio tyrimo rezultatai, jų analizė ir apibendrinimas.

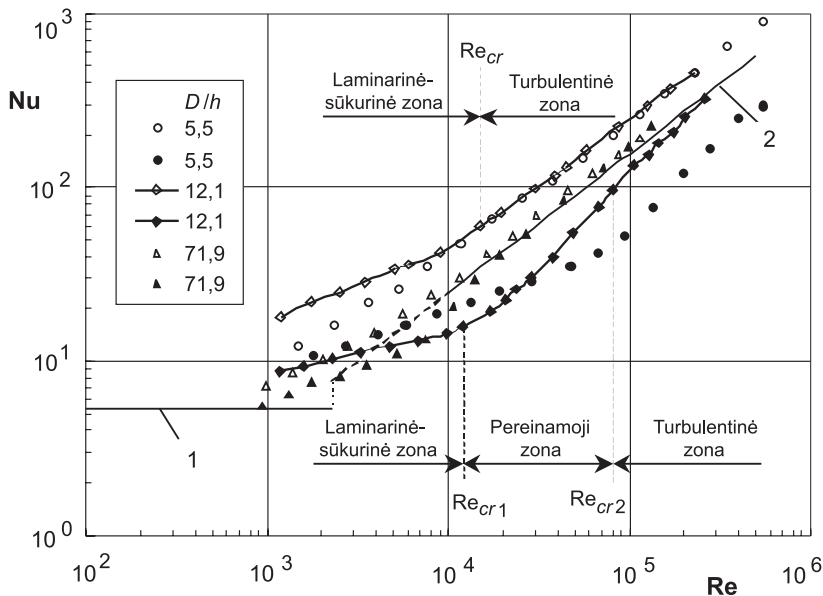
## 2. ANKSTESNIŲ DARBŲ APŽVALGA

Srauto užsukimo įtaka hidrodinamikai ir šilumos mainams kanaluose buvo analizuota keliose ankstesnėse monografijose [1–4],

daugiatomyje pastarojo meto monografijų rinkinyje [5–7], daugelyje apžvalgų [8–10] ir kt. Labai reikšmingas teoriniu ir praktiniu požiūriu yra 7 tomų monografijų rinkinys, kurio [5–7] tiesiogiai analizuojami šilumos mainai ir hidrodinamika veikiant masinėms išcentrinėms jėgoms visais įmanomais srauto užsukimo būdais (kreivi kanalai, besisukantys srautai, pradinis užsukimas). Apžvalgose [8–10] išanalizuoti ir apibendrinti vidutiniai šilumos mainai ir hidrodinamika apvalaus skerspjūvio gyvatukuose.

Kaip minėta, gauti rezultatai pirmiausia susiję su vidutinėmis pagal kanalo ilgį ir perimetrą arba tik kanalo ilgį termohidraulinėmis charakteristikomis. Vietinis šilumos atidavimas pagal perimetrą ir kanalo ilgį išanalizuotas daug mažiau. Daugeliu atvejų tokie tyrimai atlikti labai trumpuose stačiakampio skerspjūvio kreivuose kanaluose [5, 11–13], kurie parodė ženklų atskirų paviršių šilumos atidavimų skirtumą.

Mūsų ankstesniuose darbuose [14–17] eksperimentiškai buvo tyrinėti įvairūs vietinio šilumos atidavimo aspektai ilguose plokščiuose sraigtiniuose kanaluose. Plačiame režiminių ir geometrinių parametrų intervale ištirtas sraigtinių kanalų įgaubto ir išgaubto paviršių stabilizuotas šilumos atidavimas ir kanalų hidraulinis pasipriešinimas bei gautos apibendrinančios priklausomybės. Toliau apžvelgsime mūsų ankstesnių darbų [15–17] rezultatus apie stabilizuotus vietinius šilumos mainus sraigtiniuose kanaluose, kurie yra susiję ir reikalingi analizuojant įgaubto ir išgaubto paviršių šilumos atidavimą pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje.



1 pav. Tekėjimo režimai sraigtiniame kanale ( $D/h = 12,1$ ) ir kreivumo parametro  $D/h$  įtaka stabilizuotam įgaubto (šviesūs taškai) ir išgaubto (tamsūs taškai) paviršių šilumos atidavimui [17] (aiškumo dėlei kanalo  $D/h = 12,1$  duomenys sujungti). 1, 2 – žr. 3 pav.

1 pav. parodyta būdingų geometrinių parametru sraigtinių kanalų įgaubto ir išgaubto paviršių šilumos atidavimo (Nu skaičių) priklausomybė nuo Re. Kaip akivaizdžiai matyti 1 pav., beveik visame Re skaičių intervale stabilizuotas šilumos atidavimas nuo įgaubto paviršiaus yra didesnis negu nuo išgaubto paviršiaus. Didėjant sraigtinių kanalų kreivumui (mažėjant  $D/h$ ), įgaubto ir išgaubto paviršių šilumos atidavimų skirtumas taip pat didėja. Lyginant su tiesiu plokščiu kanalu, įgaubto paviršiaus šilumos atidavimas yra didesnis, o išgaubto paviršiaus – mažesnis ir, mažėjant sraigtinių kanalų kreivumui, abiejų paviršių šilumos atidavimas artėja prie tiesaus plokščio kanalo šilumos atidavimo.

Pagal šilumos atidavimo sraigtiniuose kanaluose duomenis buvo išskirtos būdingos tekėjimo režimų zonos, kurias apibrėžė kritiniai Re skaičiai (1 pav. šios zonos nurodytos vienam iš kanalų, kurio  $D/h = 12,1$ ). Įgaubto paviršiaus šilumos atidavime yra šios zonos:

- laminarinė-sūkurinė zona,  $Re < Re_{cr}$ , kurioje vyrauja didelio mastelio sūkuriai;
- turbulentinė zona,  $Re > Re_{cr}$ , kurioje yra išsivystęs turbulentinis tekėjimas.

Išgaubto paviršiaus šilumos atidavime yra šios zonos:

- laminarinė-sūkurinė zona,  $Re < Re_{cr1}$ ;
- pereinamoji zona iš laminarinio-sūkurinio į turbulentinį tekėjimą,  $Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$ ;
- turbulentinė zona,  $Re > Re_{cr2}$ .

Sraigtiniuose kanaluose į turbulentinį tekėjimą pereinama esant didesniems Re, negu tiesiuose kanaluose, ir šis perėjimas yra ne laiptuotas, o sklindus. Be to, didesnio kreivumo kanaluose į turbulentinį tekėjimą ant įgaubto ir išgaubto paviršių pereinama esant skirtingiems Re ir su akivaizdžia pereinamoji zona ant išgaubto paviršiaus.

Rezultatai apibendrinti atsižvelgiant į tekėjimo režimus, kuriuos apibrėžė kritiniai Re skaičiai. Apibendrinant stabilizuotą vietinį išgaubto ir įgaubto paviršių šilumos atidavimą, Nu skaičiai buvo normuojami atžvilgiu tiesaus plokščio kanalo šilumos atidavimo, kuris gaunamas pagal [18] pateiktą priklausomybę  $Pr = 0,7-100$  ir  $Re = 10^4-10^6$  intervale ribiniu žiedinio kanalo vienpusio kaitinimo atveju, kai  $d_1/d_2 = 1$ :

$$Nu_{0\infty} / Nu_t = 1 - f(Pr); \quad (1)$$

čia  $f(Pr) = 0,45 / (2,4 + Pr)$  apibrėžia Prandtlio skaičiaus įtaką, o  $Nu_t$  aprašo stabilizuotą šilumos atidavimą vamzdyje, kuris pagal [19] dujų srautuose, kai  $Pr = 0,65-1$ , apskaičiuojamas iš kriterinės lygties:

$$Nu_t = 0,0225 Re^{0,8} Pr^{0,6}. \quad (2)$$

1 lentelėje parodytos pastarojo darbo [17] pateiktos patikslintos apibendrinančios tekėjimo režimų ir vietinio išgaubto ir įgaubto sraigtinių kanalų paviršių (sienelių) šilumos atidavimo priklausomybės.

Kokybiškai panašūs rezultatai buvo gauti tiriant vietinį šilumos atidavimą gyvatukuose [16]. Čia taip pat nustatytas šilumos atidavimo padidėjimas ant įgaubtos gyvatuko sudaromosios ir šilumos atidavimo sumažėjimas ant išgaubtos sudaromosios. Be to, tiesaus vamzdžio atžvilgiu santykinis šilumos atidavimas pagal gyvatukų ilgį ant įgaubtos sudaromosios didėja ženkliai, artėdamas prie stabilizuotų reikšmių, tuo tarpu ant išgaubtos sudaromosios keičiasi nedaug.

### 3. METODINIAI KLAUSIMAI

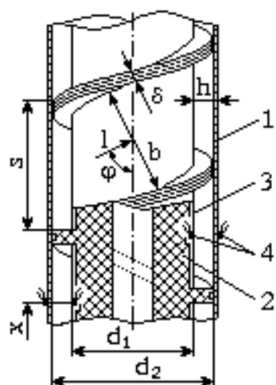
Stačiakampio skerspjūvio sraigtinio kanalo geometrija ir pagrindiniai geometriniai parametrai parodyti 2 pav. Sraigtinis kanalas buvo suformuotas iš išorinio kalorimetrinio vamzdžio (1), kurio išorinis skersmuo 38,1 mm, sienelės storis 1,0 mm ir ilgis 720 mm, bei keičiamo tekstolitinio šneko (2) su ant jo pagrindo užvyniota kalorimetrine folija (3), kurios storis buvo 0,1 mm. Tokiu būdu buvo gaunamas sraigtinis kanalas su įgaubtu ir išgaubtu šilumą atiduodančiais paviršiais. Tekstolitinis šnekas su kalorimetrine folija leido nustatyti tik įgaubto ir išgaubto šoninių paviršių (be galinių paviršių) šilumos atidavimą. Kanalo kalorimetriniai paviršiai buvo kaitinami nuolatine elektros srove. Kanalo sienelių temperatūros buvo matuojamos vario-konstantano termoporomis, privirintomis ant nedrekinamų kalorimetrinių paviršių pusių.

1 lentelė. Pagrindinės sraigtinių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių stabilizuoto šilumos atidavimo ir tekėjimo režimų priklausomybės

Objektas	Priklausomybė	Taikymo ribos, tikslumas
<b>1. Kritiniai Re skaičiai</b>		
Išgaubtas paviršius	$Re_{cr1} = 2300 \{1 + 1,017 \exp [22 (D/h)^{-1,1}]\}$ (3)	$Re = 10^3 - 4 \cdot 10^5$ $D/h = 5 - 90$
	$Re_{cr2} = 2300 \{1 + 4,65 \exp [42500 (D/h)^{-4}]\}$ (4)	
Įgaubtas paviršius	$Re_{cr} = 2300 \{1 + 0,609 \exp [4,5 (D/h)^{-0,3}]\}$ (5)	Tikslumas $\pm 7 \%$
<b>2. Šilumos atidavimas turbulentinėje zonoje</b>		
Išgaubtas paviršius	$Nu_{1sc} / Nu_{0sc} = 0,75 + 0,003 D/h$ (6)	$Re \geq Re_{cr2}$ $D/h = 10 - 90$ Tikslumas $\pm 7 \%$
Įgaubtas paviršius	$Nu_{2sc} / Nu_{0sc} = 1,55$ (7)	$Re \geq Re_{cr}$ $5 < D/h \leq 40$ $40 < D/h < 90$ Tikslumas $\pm 7 \%$
	$Nu_{2sc} / Nu_{0sc} = 1,55 - 0,008 (D/h) - 40$ (8)	
<b>3. Šilumos atidavimas laminarinėje-sūkurinėje zonoje</b>		
Išgaubtas paviršius	$Nu_{1sc} = 1,37 Re^{0,3} (D/h)^{-0,1}$ (9)	$Re < Re_{cr1}$ $D/h = 10 - 90, b/h \geq 9$ Tikslumas $\pm 12 \%$
<b>4. Šilumos atidavimas pereinamojoje zonoje</b>		
Išgaubtas paviršius	$Nu_{1sc} = (1 - \gamma) Nu_{vortsc} + \gamma Nu_{turbsc}$ (10)	$Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$ $D/h = 10 - 90, b/h \geq 9$ Tikslumas $\pm 12 \%$
	$\gamma = \frac{Re - Re_{cr1}}{Re_{cr2} - Re_{cr1}}$ (11)	

2 lentelė. Pagrindinės sraigtinių kanalų geometrinės charakteristikos

Nr.	s	b	h	D	φ deg	b/h	D/h	L/2h
	mm							
1	30	25,6	6,05	33,1	72,4	4,2	5,5	137
2	70	54,5	3,95	47,6	55,3	13,8	12,1	111
3	120	74,2	4,0	77,7	40,0	18,5	19,4	82
4	180	36,4	4,0	134,0	29,3	9,1	33,4	72
5	231	37,8	4,03	200,0	23,6	9,4	50,2	70
6	192	28,2	2,0	144,0	29,2	14,1	71,9	143
7	250	19,5	2,65	222,8	22,8	7,4	84,2	127



2 pav. Sraigtinio kanalo geometrija ir pagrindiniai parametrai:  
1 – kalorimetrinis vamzdis (įgaubtas paviršius), 2 – tekstolitinis šnekas,  
3 – kalorimetrinė folija (išgaubtas paviršius), 4 – termoporos

Tyrimai buvo atlikti 7 sraigtiniuose kanaluose, kurių santykiniai geometriniai parametrai kito:  $D/h = 5 - 90$  ir  $b/h = 2 - 20$ . Santykinis sraigtinių kanalų kaitinamos dalies ilgis buvo  $L/2h \geq 70$ , o pradinės tiesiosios žiedinės hidrodinaminės stabilizacijos dalies ilgis buvo  $X/2h \approx 20$ . Kaip parodė šio darbo rezul-

tatų analizė, tokie ilgai buvo pakankami, kad būtų pasiekiami stabilizuoti šilumos mainai. Tačiau tiesi žiedinė kanalo hidrodinaminės stabilizacijos dalis nesudarė visiškai hidrodinamiškai stabilizuoto sraigtinio srauto, todėl, faktiškai, hidrodinaminis ir šiluminis srauto formavimasis prasidėjo tuo pačiu metu. Pagrindinės ištyrųjų sraigtinių kanalų geometrinės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje.

Vietinis šilumos atidavimas buvo nustatomas kaitinant tik įgaubtą paviršių (kalorimetrinį vamzdį) arba tik išgaubtą paviršių (kalorimetrinę foliją) 10–12 sraigtinio kanalo skerspjūvių. Tyrimai atlikti ribinėmis sąlygomis, artimomis  $q_w = \text{const}$ . Vietinis įgaubto ar išgaubto paviršių šilumos atidavimo koeficientas  $\alpha$  kiekviename skerspjūvyje buvo nustatomas iš lygties

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_f} \quad (12)$$

Nustatant šiluminio srauto konvekcinę dedamąją  $q_w$ , buvo vertinamas spinduliavimas tarp įgaubto ir išgaubto paviršių, šilumos nuostoliai į aplinką, išilginiai pertekėjimai sienelėmis bei tekstolito briaunomis uždengiamas ir šilumos atidavimo procese nedalyvaujantis kalorimetrinio vamzdžio paviršius. Paviršių temperatūra  $T_w$  kiekviename skerspjūvyje buvo matuojama paviršių

viduryje pagal kanalo plotį ir tuose pačiuose skerspjūviuose apskaičiuojama srauto temperatūra  $T_f$ . Apdorojant ir analizuojant šilumos mainų duomenis, sąlygojančiais parametrais buvo: vidutinė masinė srauto temperatūra kiekviename skerspjūvyje  $T_p$ , vidutinis masinis srauto greitis tame pačiame skerspjūvyje  $u_p$  o geometrinis parametru, kaip ir plokščio kanalo atveju, – dvigubas kanalo aukštis  $2h$ .

Apdorojant eksperimentinius duomenis, kiekvienam sraigtiniam kanalui, kiekvienam paviršiui, kiekviename skerspjūvyje buvo nustatomi nedimensiniai parametrai  $Nu$  ir  $Re$  ir analizuojami kokybiniai ir kiekybiniai atskirų paviršių šilumos atdavimo skirtumai. Šilumos atdavimo sraigtinių kanalų pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje analizė buvo atliekama lyginant  $Nu = f(Re)$  priklausomybes, esant skirtingiems  $l/2h$  ir  $D/h$ , bei santykinio šilumos atdavimo  $Nu_1/Nu_0$ ,  $Nu_2/Nu_0$  ir  $Nu_1/Nu_{1cr}$ ,  $Nu_2/Nu_{2cr}$  priklausomybes nuo  $l/2h$  ir  $D/h$ .

Pagrindiniai geometriniai sraigtinio kanalo parametrai – vidutinis kreivumo skersmuo  $D$  ir vidutinis užsukimo kampas  $\varphi$  buvo apskaičiuojami pagal įprastas priklausomybes:

$$D = \frac{0,5(d_1 + d_2)}{\sin^2 \varphi}, \quad (13)$$

$$\varphi = \arctan \frac{0,5\pi(d_1 + d_2)}{s}. \quad (14)$$

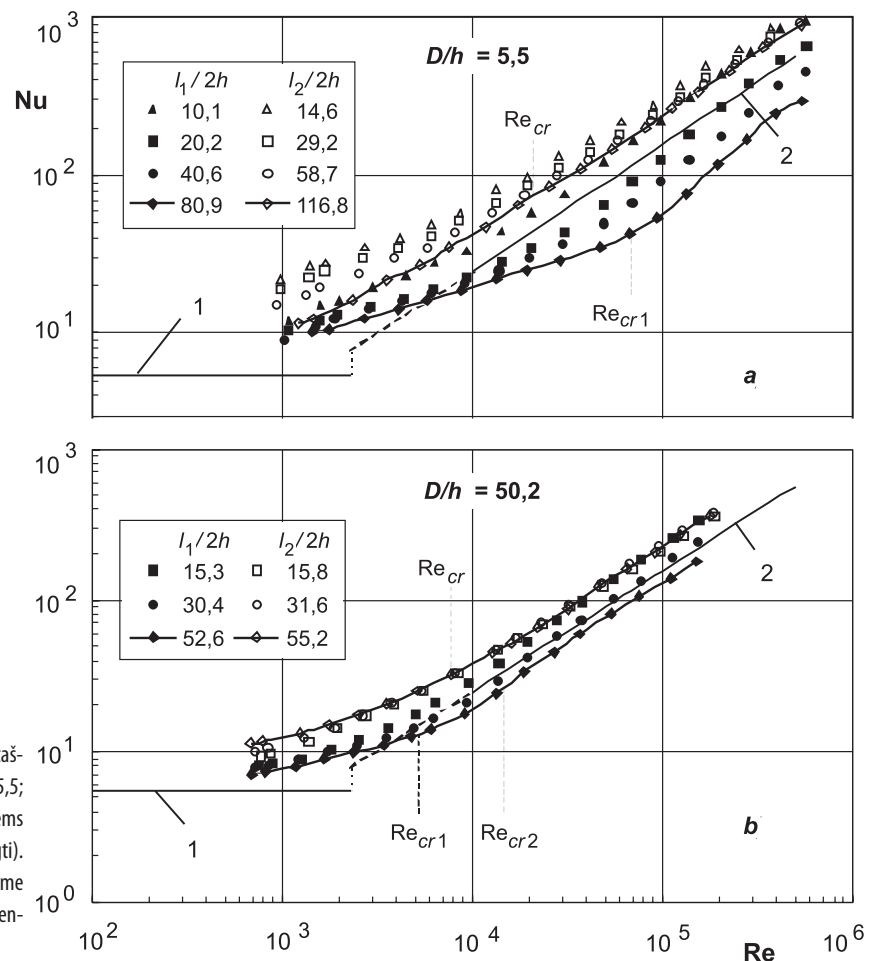
Išsamus eksperimentinio stendo ir tyrimų metodikos aprašymas yra pateiktas [20] ir [16] darbuose.

#### 4. TYRIMŲ REZULTATAI

Tyrimai ir duomenų analizė parodė, kad sraigtinių kanalų pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje, kaip ir stabilizuotoje dalyje, vietinis įgaubto ir išgaubto paviršių šilumos atdavimas skiriasi nuo šilumos atdavimo tiesiame plokščiam kanale tiek kiekybiškai, tiek kokybiškai (3 pav.).

Kaip matyti 3 pav., skirtingo kreivumo kanaluose visame ištirtajame  $Re$  skaičių intervale, didėjant  $l_1/2h$ , išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas mažėja artėdamas prie stabilizuoto šilumos atdavimo. Didėjant  $l_2/2h$ , išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas didžiausio kreivumo kanale ( $D/h = 5,5$ ) taip pat mažėja (3 pav., a), o mažesnio kreivumo kanale ( $D/h = 50,2$ ) – šiek tiek didėja (3 pav., b) artėdamas prie stabilizuoto šilumos atdavimo. Būdinga tai, kad didėjant  $l_1/2h$ , išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas intensyviau kinta pereinamojoje ir turbulentinio tekėjimo zonoje, o didėjant  $l_2/2h$ , išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas intensyviau kinta laminarinėje-sūkurinėje zonoje. Be to, pačioje pradinėje dalyje ( $l_1/2h < 15$ ) išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas beveik visoje turbulentinio tekėjimo zonoje sutampa ar net viršija įgaubto paviršiaus šilumos atdavimą. Matyt, taip yra dėl nevysiškaai hidrodinamiškai susiformavusio sraigtinio srauto pačioje pradinėje kanalo dalyje (žr. 3 skyrelį) bei sraigtinio šneko briaunų galų įtakos, dėl kurios buvo papildomai turbulizuotas srautas.

Toliau išsamiai panagrinėsime kanalų kreivumo įtaką atskirų paviršių šilumos atdavimui pradinėje šiluminės stabilizacijos



3 pav. Įgaubto (šviesūs taškai) ir išgaubto (tamsūs taškai) įvairaus kreivumo sraigtinių kanalų (a –  $D/h = 5,5$ ; b –  $50,2$ ) paviršių šilumos atdavimas esant skirtingiems  $l/2h$  (aiškumo dėlei duomenys esant vienam  $l/2h$  sujungti). 1, 2 – stabilizuotas šilumos atdavimas tiesiame plokščiam kanale esant laminariniam (1) [21] ( $Nu = 5,38$ ) ir turbulentiniam (2) pagal (1) lygtį [18] tekėjimui

dalyje normuodami  $Nu$  skaičius tiesaus plokščio kanalo ir atitinkamo paviršiaus stabilizuoto šilumos atdavimo atžvilgiu. Tokia duomenų interpretacija leidžia palyginti rezultatus sraigtiniame ir tiesiame kanaluose ir gauti universalias apibendrinančias priklausomybes. Analizė daugiausia atlikta turbulentinio tekėjimo zonoje, kadangi čia yra patikimi duomenys tiesiam plokščiam kanalui pagal ilgį.

Tiesaus plokščio kanalo šilumos atdavimui pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje apskaičiuoti panaudota [18] priklausomybė  $Pr = 0,7$  ir  $Re = 10^4 - 10^6$  intervale, pritaikyta ribiniam žiedinio kanalo atvejui, kai  $d_1 / d_2 = 1$ :

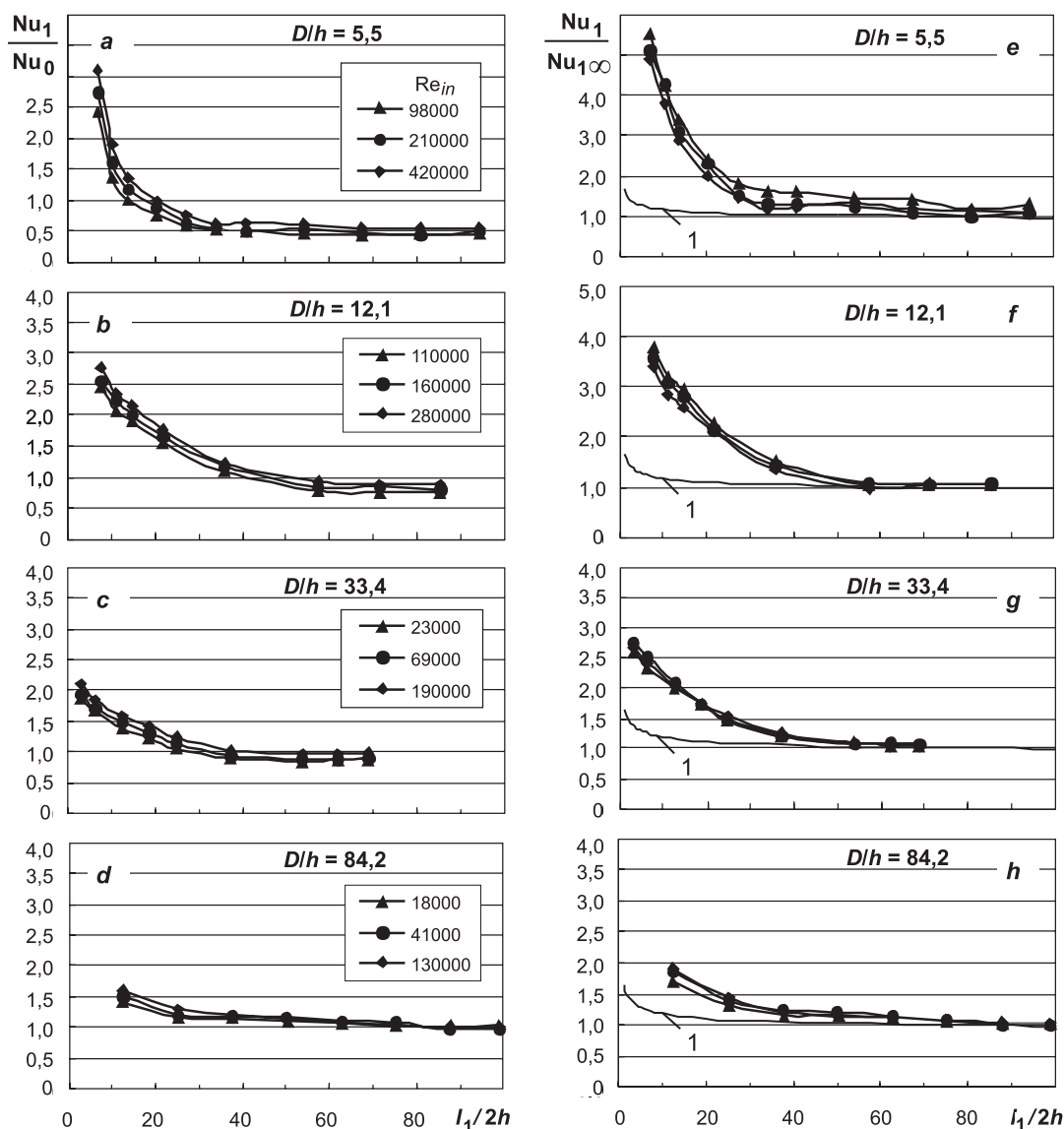
$$\frac{Nu_0}{Nu_{0\infty}} = 0,86 + 0,8 \left(\frac{x}{2h}\right)^{-0,4} \quad (15)$$

Stabilizuotas šilumos atdavimas tiesiame plokščiam kanale ( $Nu_{0\infty}$ ) įvertintas pagal (1) lygtį, o sraigtiniuose kanaluose ( $Nu_{1\infty}$ ,  $Nu_{2\infty}$ ) – iš eksperimentų, ir apibendrinimuose – pagal mūsų anksčiau gautas priklausomybes, pateiktas 1 lentelėje.

#### 4.1. Išgaubto paviršiaus šilumos atdavimo analizė

Nors sraigtinio kanalo išgaubto paviršiaus stabilizuotas šilumos atdavimas yra mažesnis negu tiesaus plokščio kanalo (1 pav.), tačiau pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas, palyginti su tiesiu plokščiu kanalu, yra didesnis ir, didėjant  $l_1 / 2h$ , mažėja artėdamas prie stabilizuoto šilumos atdavimo (4 pav., a–d). Didžiausias šilumos atdavimo padidėjimas pradinėje dalyje stebimas didesnio kreivumo ( $D/h = 5,5; 12,1$ ) kanaluose (4 pav., a, b). Mažėjant sraigtinio kanalo kreivumui (didėjant  $D/h$ ), mažėja ir šilumos atdavimo intensyvumas. Didžiausio kreivumo kanale yra ir didžiausias išgaubto paviršiaus šilumos atdavimo sumažėjimas stabilizuotoje zonoje, siekiantis iki 50 % (4 pav., a). Mažėjant sraigtinio kanalo kreivumui, šilumos atdavimas stabilizuotoje zonoje sutampa su tiesaus plokščio kanalo šilumos atdavimu (4 pav., d).

Lygindami išgaubto paviršiaus šilumos atdavimą pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje su stabilizuotu šilumos atdavimu (4 pav., e–h), matome, kad santykinis šilumos atdavimas



4 pav. Išgaubto paviršiaus šilumos atdavimas pagal kanalo ilgį atžvilgiu tiesaus plokščio kanalo (a–d) ir atžvilgiu sraigtinio kanalo stabilizuoto šilumos atdavimo (e–h) esant skirtingiems  $Re_{in} > Re_{crit}$ . 1 – tiesaus plokščio kanalo šilumos atdavimas pagal (15) lygtį [18]

sraigtniuose kanaluose taip pat yra didesnis negu tiesiame plokščiam kanale. Mažėjant kanalo kreivumui ir didėjant  $l_1/2h$ , santykinis šilumos atidavimas mažėja bei, kaip ir tiesiame kanale, palaipsniui stabilizuojasi (artėja prie 1), tačiau tiesiame kanale šilumos atidavimo stabilizacija įvyksta anksčiau.

4 pav. taip pat matyti, kad turbulentinio tekėjimo zonoje, praktiškai, nėra  $Re$  įtakos išgaubto paviršiaus šilumos atidavimo pasikeitimui. Duomenų analizė buvo atlikta visuose tekėjimo režimuose, kuriuos sąlygojo kritiniai  $Re$  skaičiai (1 lentelė), tačiau kiekvienos tekėjimo zonos ribose akivaizdžios  $Re$  įtakos nebuvo, todėl apibendrinant duomenis buvo pasirinkta turbulentinio tekėjimo zona ( $Re_m > Re_{cr2}$ ).

Būdingi apibendrinimui panaudoti visų sraigtnių kanalų duomenys esant vienam panašiam  $Re_m = (1,1-1,5) \cdot 10^5$  pateikti 5 pav. Čia neįtraukti didžiausio kreivumo ( $D/h = 5,5$ ) rezultatai, nes eksperimentų metu ant išgaubto paviršiaus nebuvo pasiektas turbulentinis tekėjimas. Kaip matyti šiame paveiksle, visi anksčiau pastebėti dėsningumai, susiję su kanalo kreivumo ir santykinio ilgio įtaka, dar akivaizdesni. Be to, 4 ir 5 pav. galima matyti, kad išgaubto paviršiaus šilumos atidavimo stabilizacija pasiekama esant didesniems  $l_1/2h$  negu tiesiame plokščiam kanale. Visiška šilumos atidavimo stabilizacija visuose sraigtniuose kanaluose pasiekta, kai  $l_1/2h \approx 50$ , tuo tarpu tiesiuose kanaluose stabilizacija įvyksta esant  $l/2h \approx 30$ .

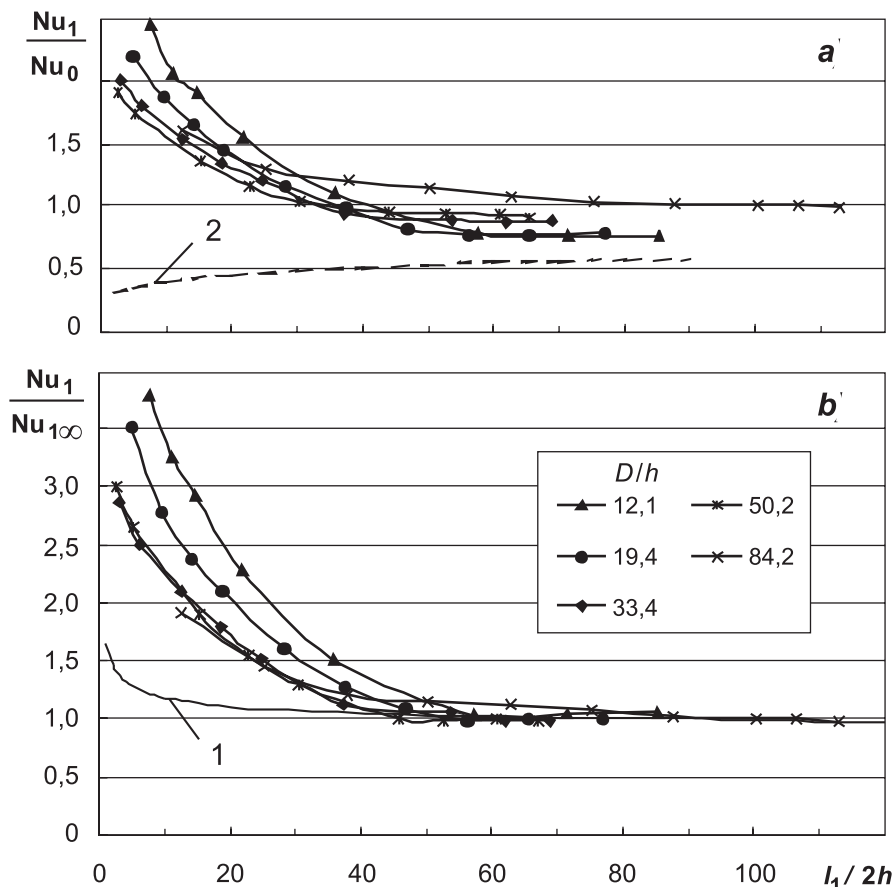
Toks ženklusnis išgaubto paviršiaus šilumos atidavimo padidėjimas pačioje pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje, kaip minėta, gali būti susijęs su visiškos hidrodinaminės stabilizacijos nebuvimu ir su papildoma srauto turbulizacija dėl šneko briaunų galų. Nors pačioje pradinėje dalyje ( $l/2h$  iki

10) santykinio šilumos atidavimo padidėjimas buvo pastebėtas ir ankstesniame mūsų darbe [14], tiriant vietinį šilumos atidavimą labai ilgame ( $l/2h \approx 300$ ) sraigtniame žiediniame kanale.

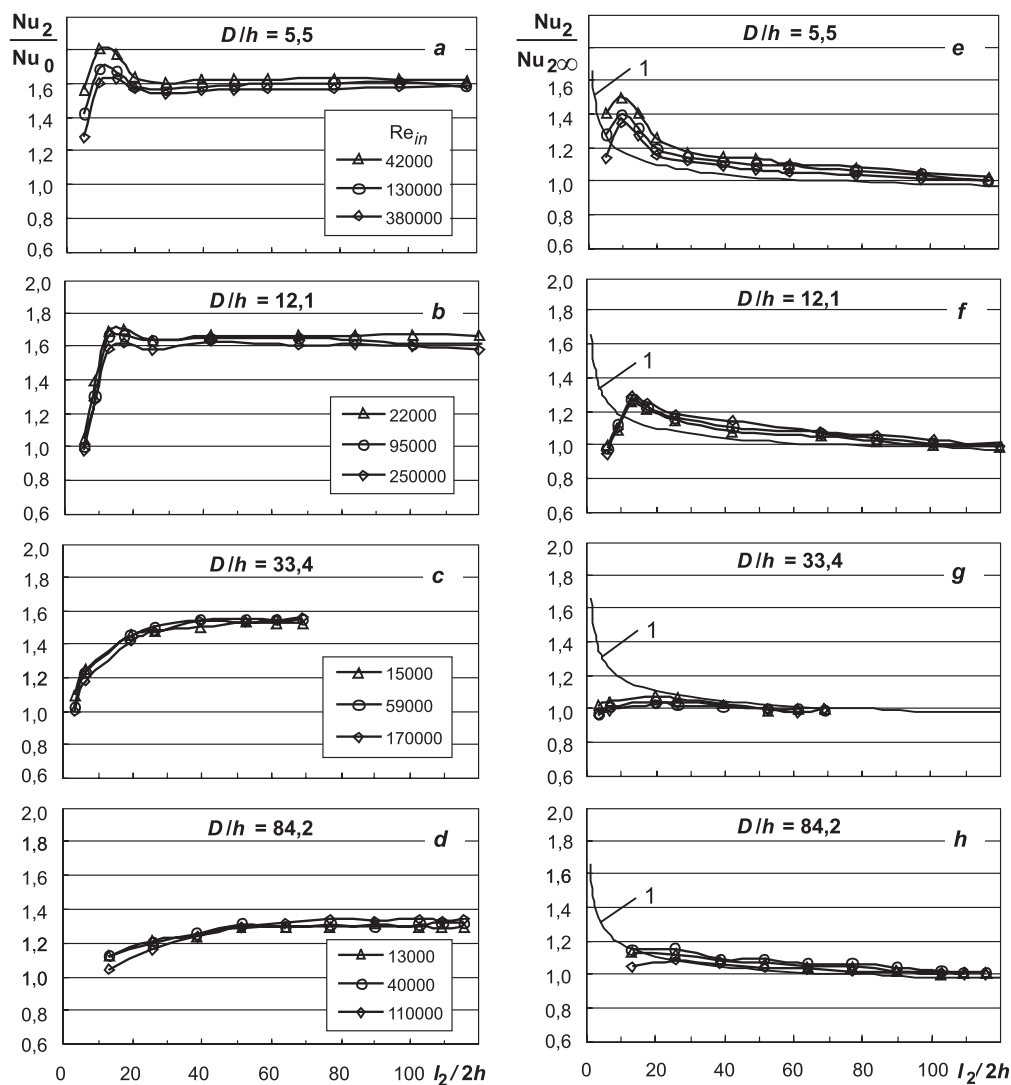
Kaip minėta, panašūs rezultatai gauti tiriant vietinį šilumos atidavimą gyvatukuose pagal perimetrą ir pagal ilgį [16] (5 pav., a). Čia taip pat gautas santykinio šilumos atidavimo sumažėjimas ant išgaubtos gyvatuko sudaromosios. Stabilizuotoje dalyje rezultatai beveik sutampa, tačiau pradinėje dalyje, matyt, dėl skirtingų įtekėjimo sąlygų rezultatai skiriasi. Be to, [16] darbe buvo ištirti tik panašaus kreivumo ( $D/d = 15,6$  ir  $23,0$ ) gyvatukai, o tai neleidžia daryti išsamesnių išvadų.

4.2. Igaubto paviršiaus šilumos atidavimo analizė

Visai kitoks yra išgaubto paviršiaus šilumos atidavimo kitimas pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje. Palyginus išgaubto paviršiaus šilumos atidavimą su tiesiu plokščiu kanalu (6 pav., a-d), matyti, kad didėjant  $l_2/2h$  šilumos atidavimas didėja artėdamas prie stabilizuoto šilumos atidavimo. Didžiausias šilumos atidavimo intensyvumas yra didesnio kreivumo ( $D/h = 5,5; 12,1$ ) kanaluose pačioje pradinėje dalyje ( $l_2/2h < 20$ ). Be to, šiuose kanaluose pastebimas anomalinis šilumos atidavimo padidėjimas-sumažėjimas  $l_2/2h = 10-20$  zonoje, kai šilumos atidavimas padidėja virš stabilizuoto šilumos atidavimo ir po to greitai sumažėja (6 pav., a, b). Didžiausias šilumos atidavimo padidėjimas stabilizuotoje zonoje iki 60 % taip pat matyti didesnio kreivumo kanaluose (6 pav., a, b). Mažėjant sraigtnio kanalo kreivumui, šilumos atidavimas stabilizuotoje zonoje taip pat mažėja.



5 pav. Išgaubto paviršiaus santykinis šilumos atidavimas pagal įvairaus kreivumo sraigtnių kanalų ilgį turbulentinio tekėjimo zonoje ( $Re_m = (1,1-1,5) \cdot 10^5$ ). a – tiesaus plokščio kanalo atžvilgiu, b – sraigtnio kanalo stabilizuoto šilumos atidavimo atžvilgiu. 1 – žr. 4 pav., 2 – šilumos atidavimas gyvatuke ant išgaubtos sudaromosios [16],  $D/d = 15,6$  ( $d$  – gyvatuko vamzdžio skersmuo)



6 pav. Įgaubto paviršiaus šilumos atidavimas pagal kanalo ilgį tiesaus plokščio kanalo atžvilgiu (a–d) ir sraigtnio kanalo stabilizuoto šilumos atidavimo atžvilgiu (e–h) esant skirtingiems  $Re_{in} > Re_{cr,1}$  – žr. 4 pav.

Palyginus įgaubto paviršiaus šilumos atidavimą pradinėje šiluminėje dalyje su stabilizuotu šilumos atidavimu (6 pav., e–h), matyti, kad santykinio šilumos atidavimo kitimas sraigtniuose kanaluose yra panašus į santykinio šilumos atidavimo kitimą tiesiame plokščiame kanale ir mažai priklauso nuo kanalų kreivumo, išskyrus pačią pradinę dalį ( $l_2/2h$  iki 20). Šioje dalyje stebimas anomalinis įgaubto paviršiaus šilumos atidavimo padidėjimas-sumažėjimas didesnio kreivumo ( $D/h = 5,5; 12,1$ ) kanaluose (6 pav., e, f), o mažesnio kreivumo kanaluose yra artimas tiesaus kanalo šilumos atidavimui.

6 pav. taip pat matyti, kad turbulentinio tekėjimo zonoje, praktiškai, nėra  $Re$  įtakos įgaubto paviršiaus šilumos atidavimo pasikeitimui. Duomenų analizė buvo atlikta visuose tekėjimo režimuose, kuriuos apibrėžė kritiniai  $Re$  skaičiai (1 lentelė), tačiau kiekvienos tekėjimo zonos ribose akivaizdžios  $Re$  įtakos nebuvo, todėl apibendrinant duomenis buvo pasirinkta turbulentinio tekėjimo zona ( $Re_{in} > Re_{cr,1}$ ).

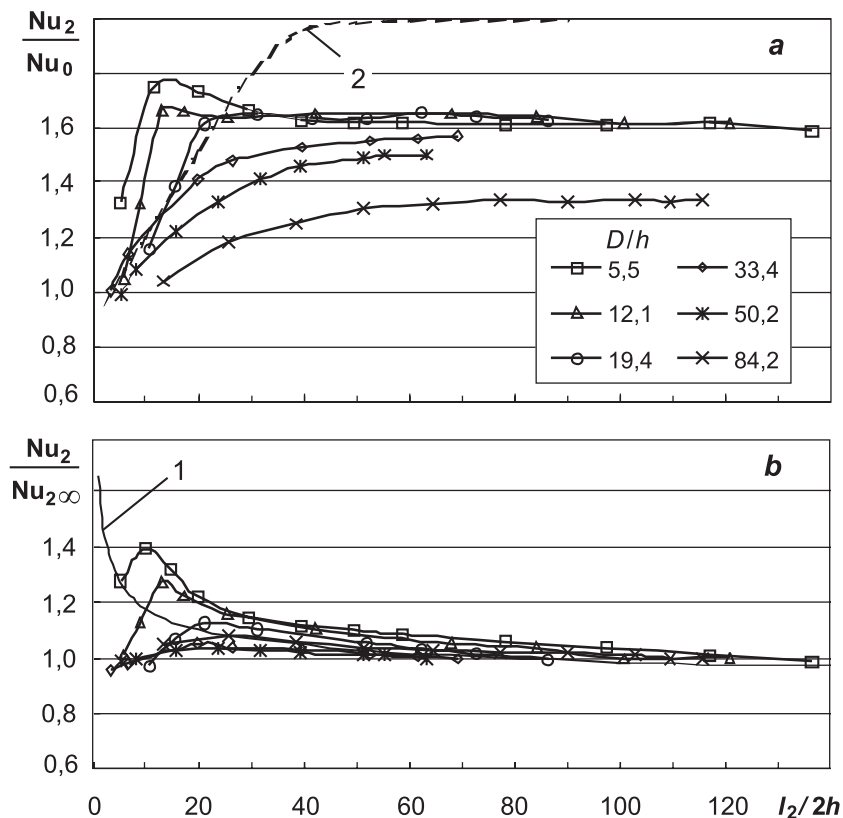
Būdingi apibendrinimui panaudoti visų sraigtnių kanalų duomenys esant vienam panašiam  $Re_{in} = (0,9–1,2) \cdot 10^5$  pavaizduoti 7 pav. Kaip matyti šiame paveiksle, visi anksčiau aptarti dėsningumai, susiję su kanalo kreivumo ir santykinio ilgio įtaka,

dar akivaizdesni. Be to, čia dar galima įžiūrėti anomalinio šilumos atidavimo pačioje pradinėje sraigtnių kanalų dalyje ( $l_2/2h$  iki 20) padidėjimo-sumažėjimo maksimumo priklausomybę nuo kanalų kreivumo (7 pav., b). Didėjant kanalo kreivumui, šilumos atidavimo pasikeitimo maksimumas mažėja ir tolsta nuo kanalo pradžios. Taip pat 6 ir 7 pav. galima matyti, kad įgaubto paviršiaus šilumos atidavimo stabilizacija, kaip ir tiesiame kanale, pasiekama esant  $l_2/2h \approx 30$ , nors visiškai stabilizacija monotoniškai tęsiasi iki  $l_2/2h \approx 100$ .

Kaip minėta, kokybiškai panašūs rezultatai gauti tiriant vietinį šilumos atidavimą gyvatukuose pagal perimetrą ir pagal ilgį [16] (7 pav., a). Čia taip pat gautas ženkliai padidėjęs santykinis šilumos atidavimas ant įgaubtos gyvatuko sudaromosios. Santykinio šilumos atidavimo kitimo pagal ilgį pobūdis labai panašus, nors stabilizuotoje dalyje santykinis šilumos atidavimas gyvatuke didesnis.

## 5. REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Rezultatų apibendrinimas buvo atliktas normuojant kiekvieno paviršiaus šilumos atidavimą ( $Nu$  skaičius) atžvilgiu atitinkamo paviršiaus stabilizuoto šilumos atidavimo, atsižvelgus į santykinį



7 pav. Įgaubto paviršiaus santykinis šilumos atidavimas pagal įvairaus kreivumo sraigtnių kanalų ilgį turbulentinio tekėjimo zonoje ( $Re_m = (0,9-1,2) \cdot 10^5$ ). a – tiesaus plokščio kanalo atžvilgiu, b – sraigtnio kanalo stabilizuoto šilumos atidavimo atžvilgiu. 1 – žr. 4 pav., 2 – šilumos atidavimas gyvatuke ant įgaubtos sudaromosios [16],  $D/d = 15,6$

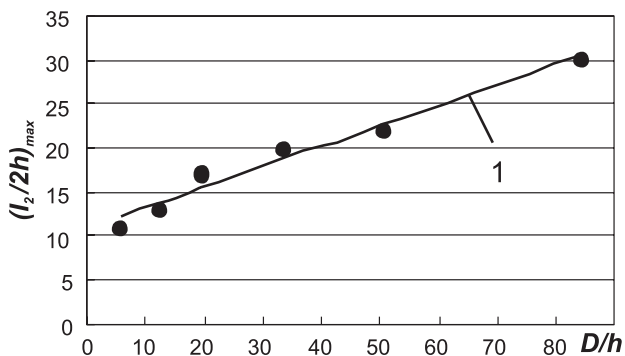
sraigtnio kanalo ilgį, įvertinus kreivumo įtaką (5 pav., b ir 7 pav., b). Kreivumo įtaka išgaubto paviršiaus šilumos atidavimui pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje gali būti įvertinta pagal šią priklausomybę:

$$\frac{Nu_1}{Nu_{1\infty}} = 0,9 + 0,001D/h + (4,0 - 0,022D/h) \exp\left[\frac{-l_1/2h}{27,3(D/h)^{-0,15}}\right] \quad (16)$$

(16) lygtis taikytina  $l_1/2h \geq 10$ ,  $D/h = 10-90$  ir  $Re_{cr2} < Re < 4 \cdot 10^5$  intervale ir apibendrina eksperimentinius duomenis  $\pm 10\%$  tikslumu.

Vertinant įgaubto paviršiaus šilumos atidavimą pagal sraigtnių kanalų ilgį, pirmiausia apskaičiuojamas santykinis ilgis, kur stebimas šilumos atidavimo maksimumas (7 pav., b) ir kuris, mažėjant sraigtnių kanalų kreivumui  $D/h$ , didėja (8 pav.):

$$(l_2/2h)_{max} = 11,0 + 0,23 (D/h). \quad (17)$$



8 pav.  $(l_2/2h)_{max}$  priklausomybė nuo sraigtnių kanalų kreivumo. 1 – pagal (17) lygtį

Tada kreivumo įtaka įgaubto paviršiaus šilumos atidavimui sraigtnių kanalų pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje, kai  $l_2/2h \geq (l_2/2h)_{max}$ , gali būti įvertinta pagal šią priklausomybę:

$$\frac{Nu_2}{Nu_{2\infty}} = 0,87 + 0,001 D/h + 4,54(D/h)^{-0,53} (l_2/2h)^{-0,5}. \quad (18)$$

(18) lygtis taikytina  $D/h = 5-90$  ir  $Re_{cr} < Re < 4 \cdot 10^5$  intervaluose ir apibendrina eksperimentinius duomenis  $\pm 7\%$  tikslumu.

Stabilizuotas išgaubto ir įgaubto paviršių šilumos atidavimas ( $Nu_{1\infty}$  ir  $Nu_{2\infty}$ ) atitinkamuose tekėjimo režimuose apskaičiuojamas pagal 1 lentelėje pateikiamas priklausomybes.

Kituose  $Re$  skaičių intervaluose pirmu priartėjimu galima taikyti anksčiau gautas priklausomybes, tačiau tikslesniam įvertinimui, ypač laminarinio-sūkurinio tekėjimo zonoje, reikia papildomų tyrimų ir detalesnės analizės. Be to, reikėtų patikslinti tekėjimo režimų pasikeitimo kritinius  $Re$  skaičius, atsižvelgus į  $l/2h$ .

### 6. IŠVADOS

Atlikus stačiakampio skerspjūvio sraigtnių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių vietinio šilumos atidavimo pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje eksperimentinius tyrimus oro sraute plačiame režiminių ( $Re = 10^3-4 \cdot 10^5$ ) ir geometrinių ( $D/h = 5-90$ ,  $b/h = 2-20$ ) parametrų intervale ir gautų rezultatų analizę, galima padaryti šias išvadas:

1. Pagal sraigtnių kanalų ilgį išgaubto paviršiaus šilumos atidavimas mažėja, o įgaubto paviršiaus didėja artėdami prie stabilizuotų reikšmių, kurios didžiausio kreivumo kanale ( $D/h = 5,5$ ) siekia  $-50\%$  išgaubtam paviršiui ir  $+60\%$  įgaubtam paviršiui nuo tiesaus plokščio kanalo šilumos atidavimo.



2. Mažėjant sraigtinių kanalų kreivumui (didėjant  $D/h$ ), abiejų paviršių šilumos atidavimo intensyvumas mažėja. Šilumos atidavimo stabilizacija ant išgaubto paviršiaus pasireiškia vėliau negu ant įgaubto paviršiaus ar tiesiame plokščiaame kanale.

3. Gautos apibendrinančios priklausomybės (16)–(18), nusakančios sraigtinių kanalų išgaubto ir įgaubto paviršių šilumos atidavimo pokytį pradinėje šiluminės stabilizacijos dalyje, lyginant su stabilizuotu šilumos atidavimu.

### Žymėjimai

$b$  – vidutinis kanalo plotis  $m$ ,  
 $c_p$  – savitoji šiluma  $J / (kg \cdot K)$ ,  
 $D$  – vidutinis kanalo kreivumo skersmuo  $m$ ,  
 $d_1, d_2$  – sraigtinio kanalo išgaubto ir įgaubto drėkinamų šoninių paviršių, atitinkamai žiedinio kanalo vidinio ir išorinio vamzdžių skersmenys  $m$ ,  
 $h$  – kanalo aukštis  $m$ ,  
 $L, l$  – sraigtinio kanalo bendrasis ( $L$ ) ir vietinis ( $l$ ) ilgis ašine kryptimi  $m$ ,  
 $Nu$  – Nuselto skaičius,  $\alpha 2h/\lambda$ ,  
 $Pr$  – Prandtlio skaičius,  $\mu c_p/\lambda$ ,  
 $q$  – šilumos srauto tankis  $W/m^2$ ,  
 $Re$  – Reinoldso skaičius,  $u 2h/\nu$ ,  
 $s$  – kanalo užsukimo žingsnis  $m$ ,  
 $T$  – temperatūra  $K$ ,  
 $u$  – masinis greitis  $m/s$ ,  
 $X, x$  – žiedinio kanalo bendrasis ( $X$ ) ir vietinis ( $x$ ) ilgis ašine kryptimi  $m$ ,  
 $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas  $W / (m^2 \cdot K)$ ,  
 $\delta$  – briaunos storis  $m$ ,  
 $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas  $W / (m \cdot K)$ ,  
 $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas  $Pa \cdot s$ ,  
 $\nu$  – kinematinės klampos koeficientas  $m^2/s$ ,  
 $\rho$  – tankis  $kg/m^3$ ,  
 $\varphi$  – vidutinis sraigtinio kanalo užsukimo kampas deg.

### Indeksai

0 – tiesus kanalas,  
 1 – išgaubtas paviršius, vidinis žiedinio kanalo vamzdis, zonos pradžia,  
 2 – įgaubtas paviršius, išorinis žiedinio kanalo vamzdis, zonos pabaiga,  
 $\infty$  – stabilizuotas šilumos atidavimas,  
 $cr$  – kritinis,  
 $f$  – sraute,  
 $in$  – įtekėjime,  
 $t$  – vamzdyje,  
 $turb$  – turbulentinis,  
 $vort$  – sukūrinis,  
 $w$  – ant sienelės.

### Literatūra

1. Ustimenko B. P. Protsessy Turbulentnogo Perenosa vo Vrashchayushikhsya Techeniyakh. Alma-Ata: Nauka, 1977.
2. Shchukin V. K. Teploobmen i Gidrodinamika vnutrennikh potokov v polyakh massovykh sil. Moskva: Mašinostroyeniye, 1980.
3. Shchukin V. K., Khalatov A. A. Teploobmen, Masso-obmen i Gidrodinamika Zakruchennykh Potokov v Osesimetricnykh Kanalakh. Moskva: Mashinostroyeniye, 1982.
4. Khalatov A. A. Teoriya i praktika zakruchennykh potokov. Kiyev: Naukova Dumka, 1989.
5. Khalatov A. A., Avramenko A. A., Shevchuk I. V. Teploobmen i hidrodinamika v poliach tsentrobezhnykh massovykh sil. Tom 1. Krivolineinye potoki. Kiyev: Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy, 1996.
6. Khalatov A. A., Avramenko A. A., Shevchuk I. V. Teploobmen i Gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. T. 3. Zakruchennykh potoki. Kiyev: Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy, 2000.
7. Khalatov A. A., Borisov I. I., Shevtsov S. V. Teploobmen i Gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. T. 5. Teploobmen i Teplogidravlicheskaya effektivnost vikhreykh i zakruchennykh potokov. Kiyev: Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy, 2005.
8. Berger S. A., Talbot L., Yao L. S. Flow in curved pipes // Annual Review of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 15. P. 461–512.
9. Nandakumar K., Masliyah J. H. Swirling flow and heat transfer in coiled and twisted pipes // Advances in Transport Processes. 1986. Vol. 4. P. 49–112.
10. Gnielinski V. 2.5.14 Helically coiled tubes of circular cross sections // Heat Exchanger Design Handbook 2. New York-Wallingford: Begell House, Inc., 1998. P. 2.5.14-1–2.5.14-4.
11. Yang J. W., Liao N. Turbulent heat transfer in rectangular ducts with 180°-bend // Proceedings of 5th International Heat Transfer Conference. 1974. Vol. 2. P. 169–172.
12. Seki N., Fukusako S., Yoneta M. Heat transfer from the heated concave wall of a return bend with rectangular cross section // Wärme- und Stoffübertragung. 1982. Vol. 17. No. 1. P. 17–26.
13. Seki N., Fukusako S., Yoneta M. Turbulent heat transfer characteristics along the heated convex wall of a rectangular cross-sectional return bend // Wärme- und Stoffübertragung. 1983. Vol. 17. No. 2. P. 85–92.
14. Shimonis V. M., Poshkas P. S., Vilemas J. V. Mestnaya teplootdacha i gidravlicheskoye soprotivleniye kolcevogo vintoobraznogo kanala v potoke vozdukha // Trudy AN Litovskoy SSR. Ser. B. 1986. T. 4(155). S. 80–88.
15. Vilemas J., Poškas P., Šimonis V., Šukys V. Heat transfer and hydraulic drag in helical channels in gas flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36. P. 1693–1700.
16. Vilemas J., Poškas P. Effect of Body Forces on Turbulent Heat Transfer in Channels. Kaunas–New York: Lithuanian Energy Institute–Begell House, 1999.
17. Poškas P., Šimonis V. 2.5.15 Helical channels of rectangular cross section // Heat Exchanger Design Handbook

2008. Part 2. Fluid Mechanics and Heat Transfer, Ex. ed. G. F. Hewitt. New York–Connecticut–Wallingford: Begell House, Inc., 2008. P. 2.5.15-1–2.5.15-9.
18. Petukhov B. S., Roizen L. I. Obobshchenyye zavisimosti dlya teplootdachi v trubakh kolcevogo secheniya // Teplofizika vysokikh temperatur. 1974. T. 12. N 3. S. 565–569.
19. Kurganov V. A., Petukhov B. S. Analiz i obobshcheniye opytnykh dannykh po teplootdache v trubakh pri turbulentnom techenii gazov s peremennymi fizicheskimi svoystvami // Teplofizika vysokikh temperatur. 1974. T. 12. N 2. S. 304–315.
20. Šimonis V. M., Šukys V. P., Poškas P. S. Thermohydraulic properties (coefficients of local heat transfer and hydraulic drag) of helical channels (1. Experimental unit, procedure and preliminary experiments) // Fluid Mech. Sov. Res. 1989. Vol. 18. No. 4. P. 83–92.
21. Kakac S., Shah R. K., Aung W. Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer. New York: Wiley-Interscience Publication, 1987.

Povilas Poškas, Vytautas Šimonis

#### HEAT TRANSFER IN THE INITIAL PART OF THERMAL STABILIZATION OF HELICAL CHANNELS IN AIR FLOW

##### Summary

Experimental results, their analysis and generalization are presented for local heat transfer from the convex and concave surfaces of rectangular helical channels in the initial part of thermal stabilization in air flow over a wide range of operating ( $Re = 10^3-4 \cdot 10^5$ ) and geometrical ( $D/h = 5-90$ ,  $b/h = 2-20$ ) parameters at one-side heating.

It was established that, depending on the length of the helical channels, heat transfer from a convex surface decreases and from a concave surface increases approaching the stabilized values which in a channel of highest curvature ( $D/h = 5.5$ ) reaches up to  $-50\%$  for a convex surface and up to  $+60\%$  for a concave surface versus those in a straight flat channel. With a decrease of channel curvature (an increase of parameter  $D/h$ ), heat transfer intensity from both surfaces decreases in comparison with a straight flat channel. Also, heat transfer stabilization on a convex surface occurs later than on a concave surface or in a straight flat channel.

Correlations were obtained for changes of heat transfer from convex and concave surfaces of helical channels in the initial part of thermal stabilization in comparison with stabilized heat transfer.

**Key words:** heat transfer, helical channel, convex wall (surface), concave wall (surface), initial part of thermal stabilization

Повилас Пошкас, Витаутас Шимонис

#### ТЕПЛОТДАЧА В ВИНТООБРАЗНЫХ КАНАЛАХ НА НАЧАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

##### Резюме

Представлены анализ и обобщение результатов экспериментального исследования местной теплоотдачи выпуклой и вогнутой поверхностей винтообразных каналов прямоугольного поперечного сечения на начальном термическом участке. Исследования выполнялись в потоке воздуха, в широком интервале режимных ( $Re = 10^3-4 \cdot 10^5$ ) и геометрических ( $D/h = 5-90$ ,  $b/h = 2-20$ ) параметров при одностороннем нагреве только выпуклой или только вогнутой поверхности.

Установлено, что по длине винтообразных каналов теплоотдача выпуклой поверхности уменьшается, а вогнутой – увеличивается, приближаясь к стабилизированным значениям, которые в канале наибольшей кривизны ( $D/h = 5,5$ ) составляют для выпуклой  $-50\%$  и для вогнутой поверхности  $+60\%$  от теплоотдачи в прямом плоском канале. По сравнению с прямым плоским каналом с уменьшением кривизны винтообразных каналов (с увеличением  $D/h$ ) интенсивность теплоотдачи обеих поверхностей понижается. Также установлено, что стабилизация теплоотдачи на выпуклой поверхности проявляется позже, чем на вогнутой или в прямом плоском канале.

Получены обобщающие зависимости, определяющие изменение теплоотдачи выпуклой и вогнутой поверхностей винтообразных каналов на начальном термическом участке по сравнению со стабилизированной теплоотдачей.

**Ключевые слова:** теплоотдача, винтообразный канал, выпуклая и вогнутая стенки (поверхности), начальный участок термической стабилизации