



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

VANDENS ŠILUMOKAIČIO SLĖGIO PERKRYČIO MATEMATINIS MODELIS

Karolis Maškalo¹, Marijonas Bogdevičius²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹karolis.maskalo@gmail.com; ²Marijonas.Bogdevičius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikiamas vandens šilumokaičio slėgio perkryčio tyrimas, matematinis modelis, vandens šilumokaičio optimizavimas. Aprašomas šilumokaičio veikimo principas, struktūra, jame vykstantys termodinaminiai procesai. Atliktas vandeninių šilumokaičių slėgio perkryčio skaičiavimus prie skirtingų šilumokaičio parametrų: gabaritinių vandens šilumokaičio parametrų, aliuminio vingiuotų plokštelių gabaritų ir tarpo tarp jų, bei varinių vamzdelių eilių skaičiaus. Pateikti vandens šilumokaičių matematinio modelio skaičiavimo rezultatai, bei išvados.

Reikšminiai žodžiai: vandens šilumokaitis, aliuminio vingiuotos plokštelės, slėgio perkrytis.

Įvadas

Šilumokaičiai dažniausiai yra naudojami vėdinimo arba kondicionavimo sistemose kaip pagrindiniai šildytuvai arba aušintuvai. Jų konstrukcija susideda iš tankiai suvertų aliuminio plokštelių per tam tikrą varinių vamzdelių kontūrą. Šiame darbe yra modeliuojamas racionalus šilumokaičių plokštelių išdėstymas su jų vingiuota forma ir vertinamas slėgio perkritis, kuris yra labai svarbus reguliuojant ventiliatorių galingumą. Tinkamai parinkti šilumokaičiai sumažina įrenginių energijos sąnaudas ir sumažina eksploatacijos išlaidas.

Su šilumokaičiais ir jų parametrais yra atlikta daug tyrimų. Bourabaa *et al.* (2010) atliko matematinius keturių eilių su tiesiomis plokštelėmis šilumokaičio šilumos perdavimo skaičiavimus prie drėgnos ir sausos aplinkos. Įvertino drėgmės įtaką šilumokaičio naudingumui, kad kuo didesnė drėgmė tuo didesnis perdavimo koeficientas ir jis labai stipriai priklauso nuo oro srauto greičio per šilumokaičio plokšteles.

Wongwises ir Chokeman (2005) tyrė vandens šilumokaičius su banguotomis plokštelėmis ir variniais vamzdeliais šilumos perdavimą. Rezultatai parodė, kad šilumos perdavimas nelabai stipriai priklauso nuo šilumokaičio plokštelių atstumo. Tačiau didėjant tarpui tarp plokštelių ir vamzdelio eilių skaičiui oro srauto trintis mažėja.

Ma *et al.* (2007) atliko tyrimą su vandens šilumokaičiais ir įvairių gabaritinių parametrų žaliuzės formos aliuminio plokštelėmis. Plokštelės buvo padengtos hidrofiline danga ir tyrimai atlikti prie drėgnų sąlygų. Atlikti

tyrimai parodė, kad kuo didesnis drėgnumas aplinkoje tuo labiau krenta plokštelės šiluminis ir trinties efektyvumas.

Gupta *et al.* (2007) – mokslininkų grupė kuri tyrė temperatūrinių procesų ir slėgio perkryčio priklausomybę nuo šilumokaičio gabaritinių parametrų. Jie tyrė šilumokaičius su eglutės formos plokštelėmis prie žemos oro temperatūros. Parodė kaip slėgio parametrai priklauso nuo gabaritinių paties šilumokaičio parametrų ir plokštelės atskirai.

Kim ir Kim (2005) tyrė šilumokaičius su plokščiomis aliuminio plokštelėmis ir išdėstytomis labai dideliais tarpais. Buvo tiriamas šilumos perdavimas prie keturių eilių šilumokaičio vamzdelių kontūro. Tyrimai parodė, kad išskirstyto vamzdelių kontūro šilumokaičiai turėjo 10 % didesnį šilumos perdavimo koeficientą negu eile išdėstyto kontūro. Taip pat kuo didesni tarpai tarp aliuminio plokštelių tuo perdavimo koeficientas yra mažesnis.

Vandeninio šilumokaičio struktūra ir veikimo principas

Standartiškai vandens šilumokaičiai susideda iš aliuminio plokštelių ir vario vamzdelių. Naudojamos aliuminio plokštelės būna įvairių formų, bet atlikus mokslinių darbų analizę matematiniam modelyje bus naudojamos išskirtinės banguotos formos plokštelės. Jų šilumos perdavimo koeficientas yra geresnis už lygios ir eglutės formos plokšteles. Pagrindinis vandens šilumokaičio darbas yra pašildyti arba atšaldyti tiekiamą orą. Svarbiausi vandens šilumokaičio rodikliai yra šilumos perdavimo koeficientas ir slėgio perkrytis per jį.

Vandeninio šilumokaičio matematinis modelis

Matematiniam modelyje naudojama Wang, C.-C., Lee, C.-J., Chang, C.-T., *et al.* (1999) pateikta metodika. Visi skaičiavimai buvo atlikti prie sausos aplinkos neįvertinant drėgmės. Paveiksle (1 pav.) pateikta šilumokaičio matematinio modelio schema.

Oro srauto masės debitas apskaičiuojamas:

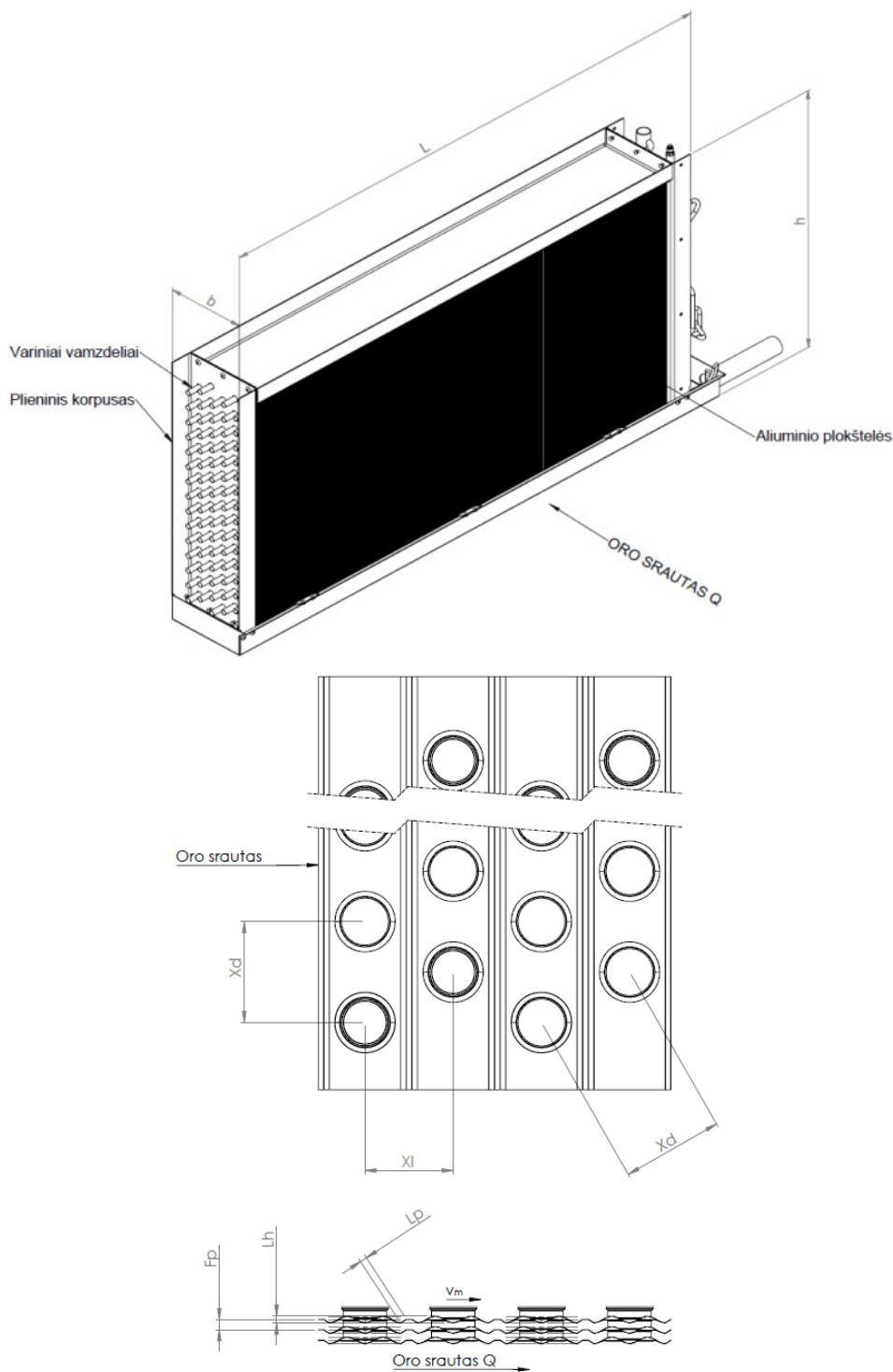
$$m = \rho \cdot Q, \quad (1)$$

čia: ρ – oro tankis (sausas), Q – oro srautas per vandens šilumokaitį.

Pradinis oro srauto greitis nustatomas:

$$v_0 = \frac{Q}{L \cdot h'}, \quad (2)$$

čia: h – viso šilumokaičio aukštis, L – viso šilumokaičio ilgis.



1 pav. Vandeninio šilumokaičio ir aliuminio plokštelės schema

Oro srauto greitis per šilumokaičio aliuminio plokštelės nustatomas:

$$v_m = v_0 \cdot \left(\frac{A_{f \text{ int}}}{A_{f \text{ int}} - A_{\text{min} t}} \right), \quad (3)$$

čia: $A_{f \text{ int}}$ – bendras plotas kurį dengia aliuminio plokštelės, $A_{\text{min} t}$ – minimalus laisvo oro srauto plotas tarp vamzdelių.

$$A_{f \text{ int}} = L \cdot h. \quad (4)$$

$$A_{\text{min} t} = A_{\text{min}} \cdot (N_f - 1) \cdot \frac{n_0}{n_c}, \quad (5)$$

čia: A_{min} – minimalus laisvo oro srauto plotas pro plokštelės, n_0 – pilnas vamzdelių skaičius einantis per vandens šilumokaitį, n_c – varinių vamzdelių eilių skaičius.

$$A_{\text{min}} = F_p \cdot (X_d - D_c), \quad (6)$$

čia: D_c – išorinis plokštelės skylės diametras, įvertinus ir plokštelės storį, F_p – atstumas tarp aliuminio plokštelių, X_d – vertikalus atstumas tarp šilumokaičio vamzdelių.

$$D_c = d_c + 2 \cdot L_b, \quad (7)$$

čia: d_c – išorinis plokštelės skylės diametras, L_b – aliuminio plokštelių storis.

Apskaičiuojamas trinties koreliuotasis faktorius:

$$f = 0,06393 (\text{Re}_{dc})^{F5} \left(\frac{F_p}{d_c} \right)^{F6} \left(\frac{D_h}{d_c} \right)^{F7} \left(\frac{L_h}{L_p} \right)^{F6} \cdot N^{F9} (\log_e (\text{Re}_{dc}) - 4,0)^{-1,093}, \quad (8)$$

čia: Re_{dc} – Reynoldso skaičius grindžiamas vamzdžio apykaklės skersmeniu, D_h – hidraulinis diametras, L_h – aliuminio plokštelės bangos aukštis, L_p – plokštelės bangos ilgis.

$$\text{Re}_{dc} = \frac{\rho \cdot v_m \cdot D_c}{\mu}, \quad (9)$$

čia: μ – dinaminė skysčio klampa.

$$D_h = \frac{4 \cdot A_{\text{min} t} \cdot b}{A_0}, \quad (10)$$

čia: b – vandens šilumokaičio plotis, A_0 – šilumokaičio paviršiaus plotas.

$$A_0 = A_{f \text{ in}} + A_{\text{coil}}, \quad (11)$$

čia: $A_{f \text{ in}}$ – aliuminio plokštelės paviršiaus plotas, A_{coil} – vamzdelių einančių per šilumokaitį paviršiaus plotas.

$$A_{f \text{ in}} = 2 \cdot b \cdot h \cdot N_f, \quad (12)$$

čia: N_f – aliuminio plokštelių kiekis.

$$N_f = \frac{L}{F_p} + 1. \quad (13)$$

$$A_{\text{coil}} = \pi \cdot d_c \cdot L \cdot n_0. \quad (14)$$

Nustatomi koreliacijos koeficientai F5, F6, F7, F8, F9:

$$F5 = 0,1395 - 0,0101 \left(\frac{F_p}{X_i} \right)^{0,58} \cdot \left(\frac{L_h}{L_p} \right)^{-2} \left(\log_e \left(\frac{A_0}{A_{\text{coil}}} \right) \right) \left(\frac{X_l}{X_d} \right)^{1,9}, \quad (15)$$

čia: X_l – horizontalus atstumas tarp šilumokaičio vamzdelių.

$$F6 = -6,4367 \left(\frac{1}{\log_e (\text{Re}_{dc})} \right). \quad (16)$$

$$F7 = 0,071911 \log_e (\text{Re}_{dc}). \quad (17)$$

$$F8 = -2,0585 \left(\frac{F_p}{X_d} \right)^{1,67} \log_e (\text{Re}_{dc}). \quad (18)$$

$$F9 = 0,1036 \left(\log_e \left(\frac{X_l}{X_d} \right) \right). \quad (19)$$

Apskaičiuojamas slėgio perkrytis:

$$\Delta p = \frac{0,5 \cdot f \cdot G^2}{\rho} \cdot \frac{A_0}{A_{\text{min}} \cdot (N_f - 1) \cdot \left(\frac{n_0}{n_c} + 1 \right)}, \quad (20)$$

čia: G – oro masės srautas mažiausiame oro tėkmės plote.

$$G = \frac{m}{A_{\text{min}} \cdot (N_f - 1) \cdot \left(\frac{n_0}{n_c} + 1 \right)}. \quad (21)$$

Gauti rezultatai nustačius slėgio perkritį prie skirtingų vandens šilumokaičio parametrų

Matematinio modelio pagalba galime matyti kaip kinta slėgio perkritis kintant vandens šilumokaičio konstrukcijai, aliuminio plokštelių konstrukcijai ir atstumui tarp jų ar varinių vamzdelių eilių skaičiui. Visi skaičiavimo rezultatai buvo atlikti prie skirtingo oro srauto debito Q per vandens šilumokaitį. Skaičiavimuose naudoti parametrai pavaizduoti lentelėje (1 lentelė).

1 lentelė. Skaičiavimo metu naudoti parametrai

L	100 mm	Lh	1,5 mm
w	760 mm	Lp	2 mm
h	390 mm	Dc	12,7 mm
Fp	3 mm	tc	0,1 mm
nc	4		

Slėgio perkryčio pokytis nuo debito Q prie skirtingų tarpų tarp aliuminio plokštelių yra pateiktas paveiksle (2 pav.). Aukščiausias slėgio perkrytis yra pasiekiamas kai atstumas tarp plokštelių yra kuo mažesnis, tuomet slėgio perkrytis siekia net 272 Pa, o mažiausias slėgio perkrytis 1,43 Pa.

Prie skirtingo aliuminio plokštelių storių slėgio perkrytis nelabai stipriai kinta (3 pav.). Kuo plokštelė storesnė tuo slėgio perkrytis yra didesnis, didžiausias slėgio perkrytis yra 162 Pa, o minimalus 4,25 Pa.

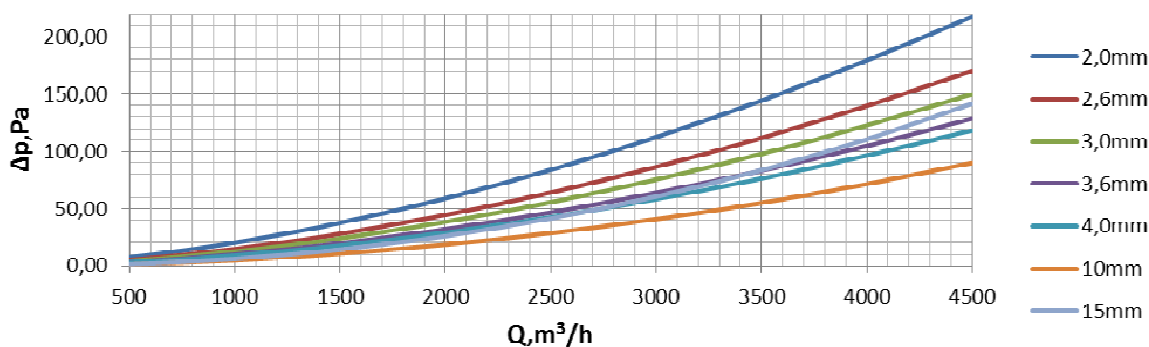
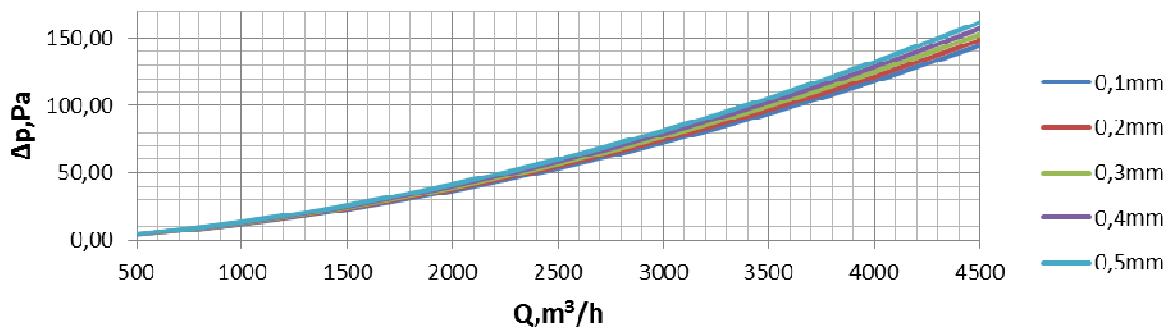
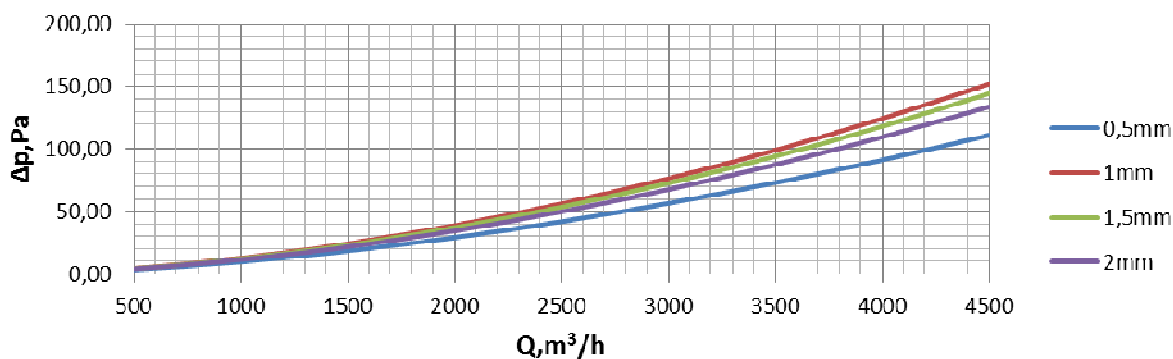
Nustačius slėgio perkryčio pokytį prie skirtingų aliuminio plokštelių bangos aukščių didžiausias slėgio

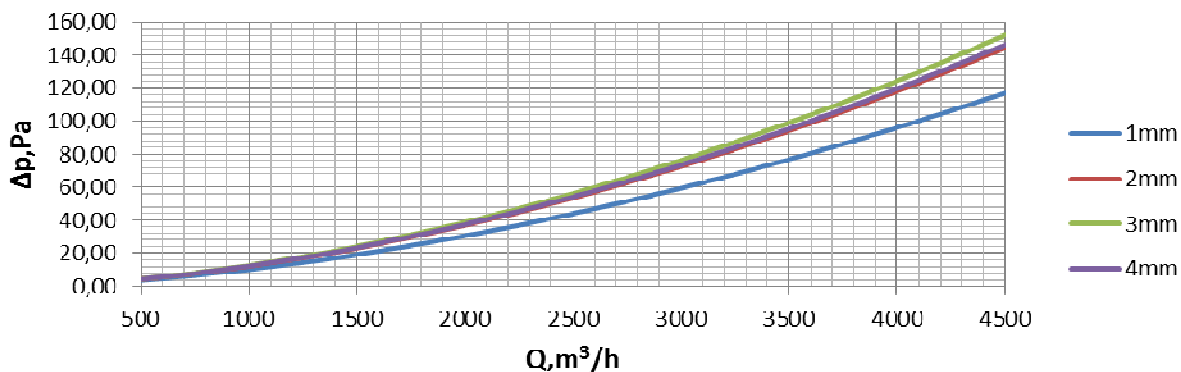
perkrytis pasiekiamas 153 Pa, o mažiausias 3,48 Pa (4 pav.).

Keičiant aliuminio plokštelės bangos ilgį slėgio perkryčio maksimali reikšmė 153 Pa, o mažiausia 3,63 (5 pav.).

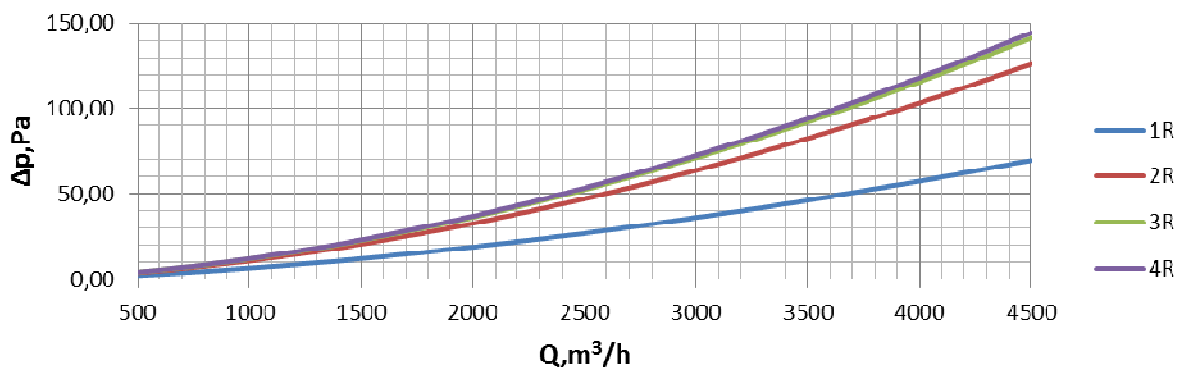
Paveiksle (6 pav.) pavaizduota slėgio perkryčio priklausomybė nuo debito Q esant skirtingam varinių vamzdelių einančių per šilumokaitį eilių skaičiui. Aukščiausias slėgio perkrytis yra pasiekiamas kai eilių skaičius yra kuo didesnis, jis siekia 145 Pa, o mažiausias slėgio perkrytis 2,43 Pa.

Labiausiai slėgio perkrytis kito keičiant gabaritinį šilumokaičio parametrus. Kintant šilumokaičio ilgiui didžiausia reikšmė slėgio perkryčio 323 Pa, o mažiausia 4,25 Pa (7 pav.). Didinant šilumokaičio plotį slėgio perkryčio reikšmė mažėja ir siekia 2,87 Pa, o didžiausia reikšmė pasiekia net 5322 Pa reikšmę (8 pav.). Vandens šilumokaičio aukščio kitimo įtaka slėgio perkryčiui yra pavaizduota (9 pav.) paveiksle. Kuomet didžiausia slėgio reikšmė yra 724 Pa, o mažiausia 1,35 Pa.

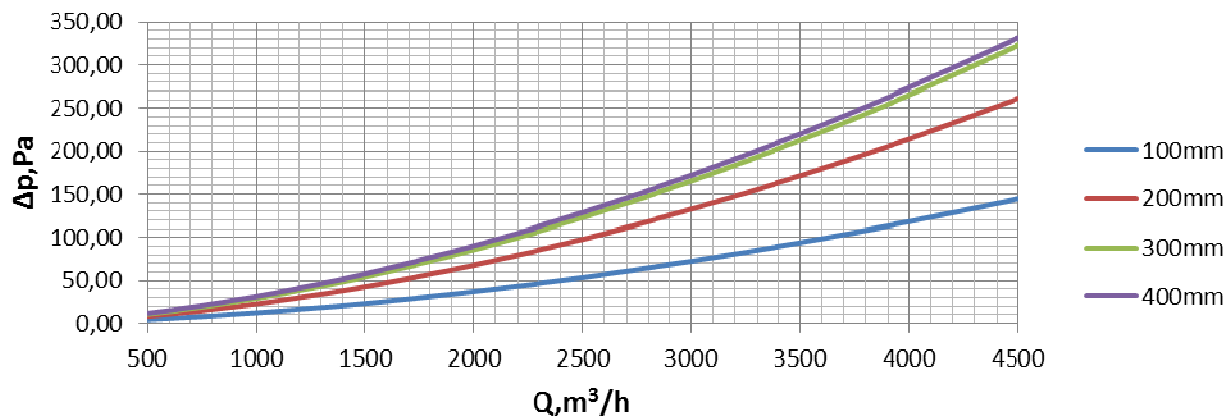
**2 pav.** Slėgio perkryčio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo aliuminio plokštelių tarpo tarp jų**3 pav.** Slėgio perkryčio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo aliuminio plokštelių storio**4 pav.** Slėgio perkryčio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo aliuminio plokštelių bangų aukščio



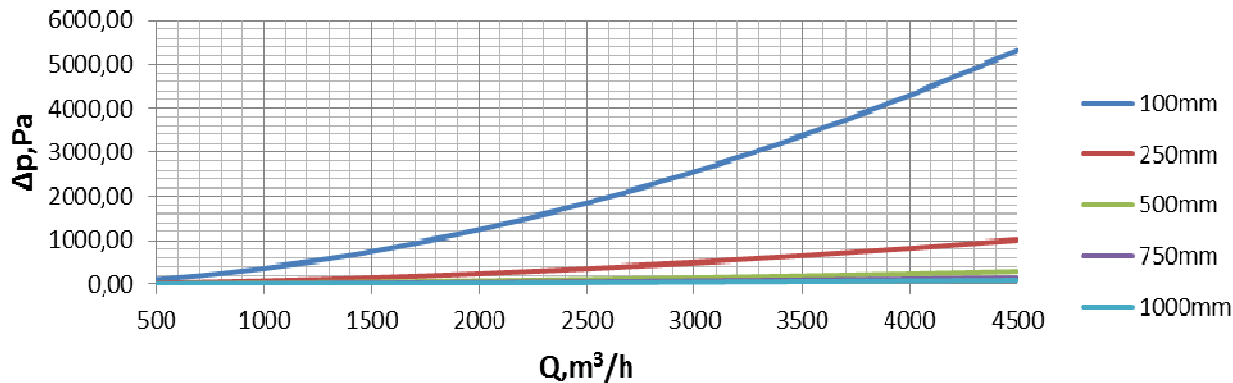
5 pav. Slėgio perkričio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo aliuminio plokštelių bangų ilgio



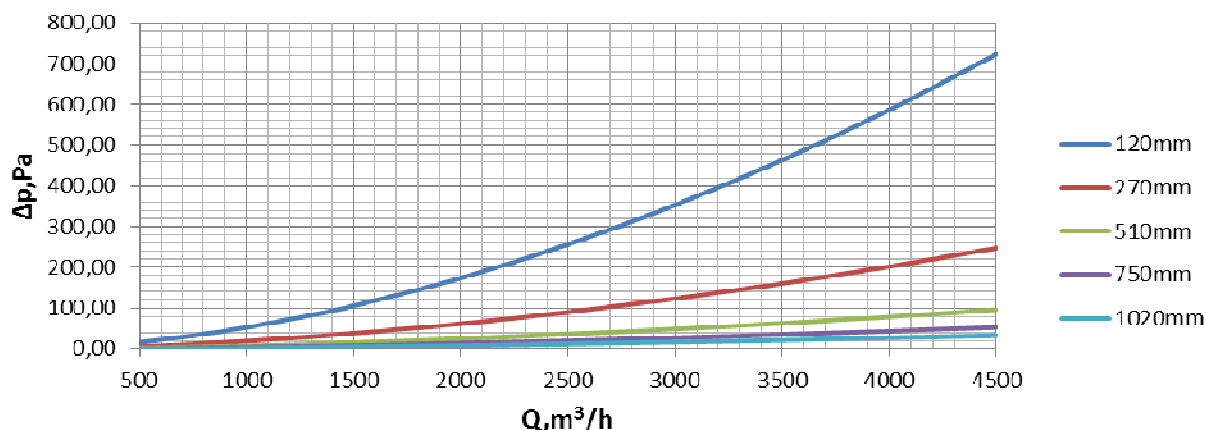
6 pav. Slėgio perkričio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo varinių vamzdelių eilių skaičiaus



7 pav. Slėgio perkričio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo vandeninio šilumokaičio ilgio



8 pav. Slėgio perkričio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo vandeninio šilumokaičio pločio



9 pav. Slėgio perkryčio priklausomybė nuo oro srauto debito prie skirtingo vandeninio šilumokaičio aukščio

Išvados

Išanalizavus gautus rezultatus, nustatyta, kad parenkant vandens šilumokaičio parametrus reikia atsižvelgti tiek į gabaritinius šilumokaičio parametrus, aliuminio banguotos plokštelės formą ir tarpą tarp jų, bei varinių vamzdelių eilių skaičių.

Didžiausią įtaką slėgio perkryčiui turi gabaritiniai šilumokaičio parametrai, svarbu parinkti tinkamų gabaritų šilumokaičius prie reikiamo oro srauto, nes slėgio perkrytis gali pakilti net iki 5,322 kPa. Kuo didesnis varinių

vamzdelių kontūro eilių skaičius tuo slėgio perkrytis yra didesnis, bet kaip matyti rezultatuose nuo didesnio eilių skaičiaus slėgio perkrytis skiriasi tik 2–5 %.

Didėjant tarpui tarp aliuminio vingiuotų plokštelių slėgio perkrytis krenta, tačiau sumažėja perdavimo koeficiento efektyvumas, todėl geriausiai, kad tarpas būtų apie 3–4 mm. Mažiausiai oro srauto perkrytis priklauso nuo skirtingo plokštelių storio. Kuo didesnis plokštelių bangos aukštis ir ilgis tuo geresnis šilumos perdavimo koeficientas dėl didesnio paviršiaus ploto, todėl optimalus variantas yra kai aukštis 1,5–2 mm, o ilgis 1–2 mm.

Literatūra

- Bourabaa, A.; Saighi, M.; Belal, I. 2011. The influence of the inlet conditions on the air side heat transfer performance of plain finned evaporator, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 59: 28–31.
- Gupta, P. K.; Kush, P.K.; Tiwari, A. 2007. Design and optimization of coil finned-tube heat exchangers for cryogenic applications, *Cryogenics* 47: 322–332.
- Kim, Y.; Kim, Y. 2005. Heat transfer characteristics of flat plate finned-tube heat exchangers with large fin pitch, *International Journal of Refrigeration* 28: 851–858.
- Ma, X.; Ding, G.; Zhang, Y.; Wang, K. 2007. Airside heat transfer and friction characteristics for enhanced fine-and-tube heat exchanger with hydrophilic coating under wet conditions, *International Journal of Refrigeration* 30: 1153–1167.
- Wang, C.-C.; Lee, C.-J.; Chang, C.-T.; Lin, S.-P. 1999. Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42: 1945–1956.
- Wongwises, S.; Chokeman, Y. 2005. Effect of fin pitch and number of tube rows on the air side performance of herringbone wavy fin and tube heat exchangers, *Energy Conversion and Management* 46: 2216–2231.