

VĒDINIMO ĮRENGINIO ŠILUMINIO PRAL AidUMO PROCESŲ
INTEGRAVIMO ATVEJAIVioleta Misevičiūtė¹, Vytautas Martinaitis², Giedrius Šiupsinskas³*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: ¹violeta.miseviciute@vgtu.lt; ²vytautas.martinaitis@vgtu.lt; ³giedrius.siupsinskas@vgtu.lt*

Santrauka. Analizuojama viešosios paskirties pastato vėdinimo įrenginyje vykstančių procesų integracijos įtaka šilumokaičių šiluminiam pralaidumui. Taikant *Pinch* analizės metodą, nustatyta, kaip kinta šilumokaičių šiluminis pralaidumas per metus. Išnagrinėta, kaip nuo disponuojamų srautų kiekio priklauso šilumokaičių šiluminis pralaidumas. Suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas didesnis tada, kai naudojami keli žemesnių parametrų srautai. Pagal šilumokaičių šiluminį pralaidumą neatliekant papildomų ekonominių skaičiavimų galima įvertinti jų dydį, kainą ir palyginti skaičiavimų rezultatus. Gauti rezultatai parodė, kad projektuojant šias sistemas naudinga vertinti vėdinimo įrenginiuose vykstančių procesų integravimo galimybes.

Reikšminiai žodžiai: vėdinimo sistema, šilumograža, šilumos pralaidumas, procesų integracija, *Pinch* analizė.

Įvadas

Oro kokybė pastatuose ir jų patalpose turi įtakos tiek pastatams, tiek juose dirbančių žmonių savijautai. Esant nepakankamam oro kiekiui pastato atitvarose kaupiasi drėgmė, susidaro pelėsis, žmonės gali susirgti įvairiomis kvėpavimo ir kitomis ligomis (Seppänen 2008).

Vėdinimo kaip proceso tikslas – užtikrinti geros kokybės oro tiekimą ir jo palaikymą patalpose (STR 2.09.02:2005). Vėdinimo orui paruošti naudojami įvairios paskirties vėdinimo įrenginiai. Dažnai, bet ne visuomet, pasirenkami įrenginiai su šilumograža, nors tokius vėdinimo įrenginius naudoti skatinama ne tik Lietuvos teisės aktuose (STR 2.09.02:2005), bet ir Europos Sąjungos bei kituose normatyviniuose dokumentuose (Europos Parlamentas ir Taryba 2010; LST EN... 2007). Pagrindinis vėdinimo įrenginių su šilumograža trūkumas – nepakankamas efektyvumas energijos naudojimo požiūriu, nes gamintojo nurodomas įrenginio temperatūrinis efektyvumas tepasiekia sezoninį efektyvumą, o nominalųjį – tik esant projektinei žiemos išorės oro temperatūrai.

Temperatūrinis efektyvumas, kuriuo dažniausiai išreiškiamas šilumogražos įrangos efektyvumas, įvairiais aspektais nagrinėtas skirtinguose darbuose. N. Parfentyeva ir kt. (2011), nagrinėdami rotacinio šilumokaičio, naudojamo vie nodam tiekiamo ir šalinamo oro kiekiui vėdinimo sistemose užtikrinti, gavo nesudėtingą išraišką tokio tipo šilumogražos įrenginio temperatūriniam efektyvumui nustatyti. Gautieji rezultatai gali būti taikomi projektuojant ir nagrinėjant minėtos šilumogražos įrangos veikimą šaltuoju metų periodu.

J. Skaisgiriene ir P. Vaitiekūnas (2008) atliko plokštelinių šilumokaičių gamintojų pagal vėdinimo įrenginių parinkimo programas pateiktų ir modeliavimo programa *Phoenix* gautų rezultatų analizę. Remdamiesi realiais duomenimis O. Pavlovskaja ir E. Juodis (2006) išnagrinėjo šilumos atgavimo įrangos efektyvumą, o T. Jonkaitis ir E. Juodis (2007) įvertino, kaip keičiasi realių šilumos atgavimo įrenginių efektyvumas, kuris labai priklauso nuo išorės oro temperatūros svyravimo. Todėl vertinant šilumos įrangos atgavimo efektyvumą būtina atsižvelgti į jos naudojimą ištisus metus, o ne vien tik šaltuoju metų laiku.

Be šilumos atgavimo įrangos, vėdinimo sistemas sudaro daugybė kitų elementų, kuriuose vykstantiems procesams naudojama įvairių rūšių energija. Pagrindiniai elementai, naudojančys energiją vėdinimo sistemose yra ventiliatoriai, šilumokaičiai ir šildytuvai. Nagrinėdamas pastato inžinerines sistemas kiekybiniu ir kokybiniu požiūriu D. Biekša (2008) nustatė, kad ventiliatoriai, šilumokaičiai ir šildytuvai daro reikšmingą poveikį viešosios paskirties pastato energijos poreikiams, sistemos termodinaminiam efektyvumui.

Kadangi pagrindiniai įrenginiai, kuriuose vyksta energijos transformacija, yra šilumokaičiai, todėl remiantis atliktų tyrimų rezultatais (Biekša, Martinaitis 2004, 2007; Biekša *et al.* 2006; Misevičiūtė, Martinaitis 2008), siekiant efektyviau naudoti energiją, procesus šilumokaičiuose reikia vykdyti esant kuo mažesniai temperatūrų skirtumui (iki 7,5 °C). Tačiau dėl to didėja šilumokaičių plotas.

Deja, dažniausiai tiems procesams vykti pasirenkami netinkami šilumnešiai, t. y. naudojami sąlygiškai aukštų parametrų ($90\text{ }^{\circ}\text{C}/70\text{ }^{\circ}\text{C}$) šilumnešiai, dėl kurių pastato inžinerinėse sistemose neefektyviai naudojama energija. Procesų kokybė šilumokaičiuose priklauso ne tik nuo šilumnešių projektinių parametrų, bet ir nuo šilumokaičių veikimo režimo, o tiksliau – nuo sistemų, kuriose jie naudojami, veikimo režimų. Kaip pabrėžiama (Sakulpipatsin *et al.* 2010) dažnai vertinant pastato inžinerinių sistemų efektyvumą, vertinama kiekviena sistema atskirai, bet ne jų visuma.

Kadangi pastatus reikia vėdinti nuolatos, todėl jiems reikia parinkti tokias vėdinimo sistemas, kurios energiją naudotų efektyviai per visą veikimo laikotarpį. Dažniausiai sistemos veikimo efektyvumui turi įtakos klimatas ir sistemų veikimo pastate procesų integralumas.

Siekiant įvertinti veiksnius, turinčius įtakos sistemų procesams vėdinimo įrenginiuose, nagrinėjami vėdinimo įrenginyje šilumogražai naudojami šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu ir procesų juose integravimo galimybės.

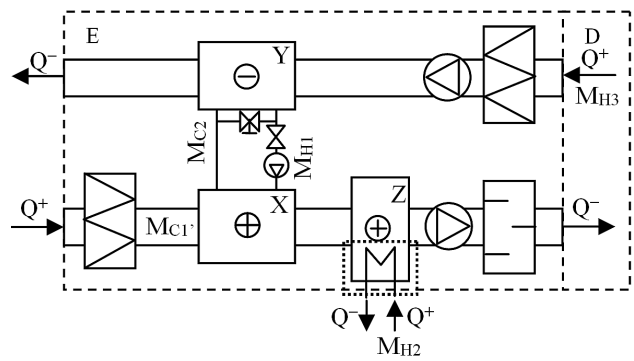
Tyrimo objektas

Šilumos atgavimas naudingas tuo, kad dalis šalinamo oro šilumos gali būti panaudota tiekiamam į patalpą orui pašildyti. STR 2.09.02:2005, kuriame reglamentuojamas efektyvus energijos naudojimas vėdinimo sistemose, pabrėžiamas šilumos atgavimo būtinumas vėdinimo sistemose. Todėl tirti pasirinktas viešosios paskirties vėdinimo sistemai naudojamas vėdinimo įrenginys su tarpiniu šilumnešiu, naudojamu šalinamo oro šilumai atgauti. Analizuojamos sistemos rodikliai pateikiami toliau.

Į paveiksle pateikta nagrinėjamo vėdinimo įrenginio schema naudojama tada, kai nėra galimybės naudoti rotacinio arba dėl didelio oro kiekio (viršijančio $40\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$) plokštelių šilumokaičių, arba kai oro tiekimo ir oro ištraukimo įrenginiai yra toli vienas nuo kito. Vėdinimo įrenginiu E į pastatą D tiekiami ir iš jo šalinami $50\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ oro.

Šio vėdinimo įrenginio šilumokaičiuose (X, Y, Z) vykstančius procesus galima išskirti į šildymo ir vėsinimo. Vėsinimo procesų metu vėstantys fluidai atiduoda šilumą šildomiems fluidams. Šilumos srautai, kurie įeina į sistemą, žymimi Q raide su ženklu „+“, kurie išeina iš sistemos – ženklu „–“. Masiniai šilumnešių debitai (M (kg/s) žymimi atitinkamais ženklais „H“, reiškiančiais „karštus“ srautus, kurie vykstant procesui atvėsta, bei „C“ – šaltus srautus, kurie vykstant procesui sušyla.

Iš šildymo sistemos grąžinamas šilumnešis (taškine linija apibrėžtas kontūras) naudojamas kaip papildomas šilumos srautas pastate vėdinimo įrenginio šildytuvui (Z) (1 pav.).



1 pav. Vėdinimo įrenginio su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumokaičiu schema

Fig. 1. The scheme of an air handling unit with run around loop heat exchanger

Tokia schema vėdinimo sistemai pasirenkama neat-sižvelgiant į tai, kaip naudingai bus panaudota papildoma, atliekama, esanti kitose pastato inžinerinėse sistemose arba technologinių procesų šiluma. Todėl šiame darbe taikant procesų integravimo metodą – *Pinch* analizę, nagrinėjami keturi atvejai:

- oro srautai, cirkuliuojantys vėdinimo sistemoje, ir į šildymo sistemą tiekiamo šilumnešio srautas;
- vėdinimo sistemos oro srautai ir papildomas iš šildymo sistemos grąžinamas šilumnešio srautas;
- vėdinimo sistemos oro srautai ir technologinio proceso šiltas vanduo;
- vėdinimo sistemos oro srautai ir abu papildomi (b) ir (c) atvejais paminėti šilumnešiai.

Papildomi srautai turi jiems būdingas pastovias ar kintamas temperatūras. Jie naudojami nemokamai, kitu atveju jie tiesiog nenaudojami. Pastaruoju metu šilumos tiekimo įmonės suinteresuotos, kad į šilumos tiekimo tinklus būtų grąžinamas žemos temperatūros parametrų šilumnešis, nes taip naudojant šilumą galima tikėtis žemesnių kainų.

Prielaidos, taikomos skaičiavimams: laikoma, kad nagrinėjamame pastate įrengtos šildymo sistemos galia – $150\ \text{kW}$. Tiekiamo ir grąžinamo į šildymo sistemą ir iš jos šilumnešio temperatūros pasirenkamos remiantis E. Tuomo (2006) pateikta ataskaita apie pastato inžinerinių sistemų darbo režimus.

Skaičiavimai atliekami taikant *Pinch* analizės metodą.

Metodika

Kadangi atliktų darbų apžvalga parodė, kad stinga kompleksiško pastato inžinerinėse sistemose vykstančių procesų tyrimų, todėl pasitelkus termodinaminę analizę grindžiamą metodą – *Pinch* analizę nustatoma, kaip veikiama sistema, kai procesai joje integruojami.

Pinch analizė, iki šiol taikyta imliems energijai pramonės procesams nagrinėti (Klemeš *et al.* 2010; Tuomaala *et al.* 2010), pastato inžinerinių sistemų analizei taikoma pirmą kartą. *Pinch* analizės tikslas nustatyti maksimalią šilumokaičiais galimą atgauti šilumos bei minimalias šildymo ir vėsinimo įrenginių galias ir parinkti optimalų (ekonomiškai požiūriu) šilumokaičių derinį.

Šilumos atgavimo nauda dažniausiai įvertinama pagal temperatūrinį šilumokaičio efektyvumą (1 formulė) (Juodis 2008):

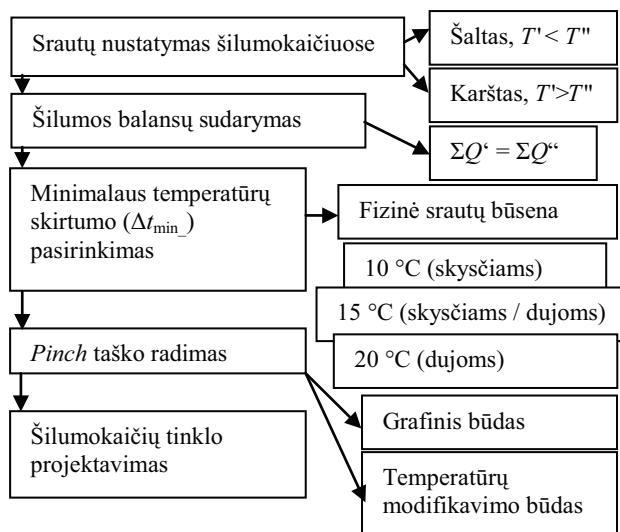
$$\eta_t = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

čia η_t – temperatūrinis efektyvumas, %; t_1 – pradinė tiekiamo oro temperatūra, paprastai lygi lauko oro temperatūrai, °C; t_2 – pašildyto tiekiamo oro temperatūra, °C; t_3 – pradinė šalinamo oro temperatūra, °C.

Kadangi šilumokaičiai yra bene pagrindiniai įrenginiai, kuriuose vykdomi šilumos (vėsos / šalčio) mainai pastato inžinerinėse sistemose, tai sujungus bent vieną šaltą ir karštą srautą galima sudaryti šilumokaitį, kuriame karštas srautas (šilumnešis) vėsdamas šildys šaltąjį. Metodas, kuris taikomas šilumokaičiams sudaryti, jungiant skirtingus srautus, vadinamas *Pinch* analize (Kemp 2007). Šis metodas atskleidžia galimybę ir parodo prasmę jungti skirtingose pastato inžinerinėse sistemose naudojamus šilumnešius.

Pinch analizė atliekama pagal 2 paveiksle pateiktą algoritmą.

Ypač svarbus *Pinch* analizės žingsnis yra procesuose dalyvaujančių srautų temperatūrų išgryninimas, pagal kurias nustatomi karšti ir šalti srautai nagrinėjamoje sistemoje. Todėl nagrinėjamoju atveju atliekama iš realaus

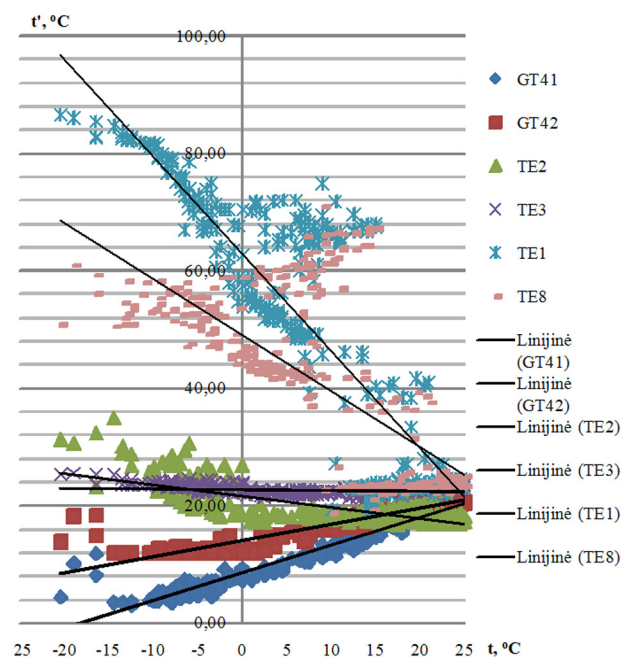


2 pav. *Pinch* analizės atlikimo algoritmas

Fig. 2. An algorithm for performing *Pinch* analysis

pastato automatizuoto valdymo sistemos (PAVS) gautų duomenų analizė, kadangi nuo pasirinktų duomenų patikimumo priklausys gautų rezultatų patikimumas.

PAVS fiksuoja šias temperatūras: patalpos oro temperatūrą (TE2), iš patalpos šalinamo oro temperatūrą (TE3), tarpinio šilumnešio temperatūras (GT41, GT42) ir atliekinio šilumnešio temperatūras (TE1, TE8). Išorės oro temperatūros duomenys (T1), gauti naudojantis meteorologijos stoties duomenimis (*Gismeteo...* 2010). Tikrinant PAVS duomenų patikimumą, įvertinama, kokios priklausomybės vyrauja tarp šilumnešių parametrų ir išorės oro temperatūros. Gautos priklausomybės pavaizduotos 3 paveiksle.

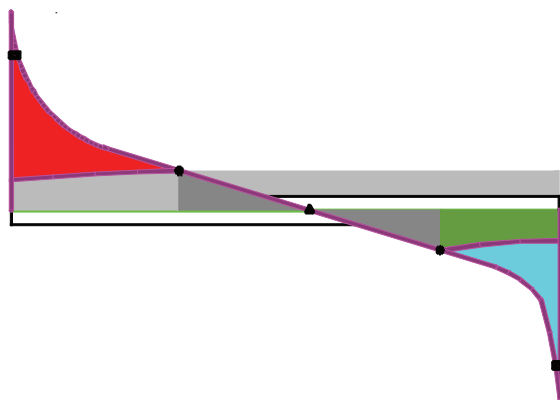
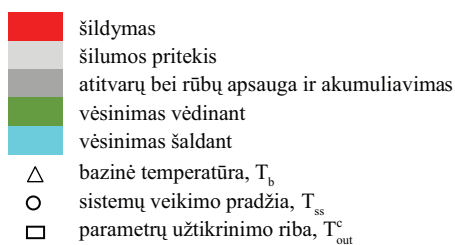


3 pav. Srautų temperatūrų priklausomybė nuo išorės oro temperatūros

Fig. 3. The dependency of stream temperatures on outdoor temperature

Remiantis gautomis tiesinėmis priklausomybėmis nustatoma, kokios konkrečios srautų temperatūros, kai išorės oro temperatūra kinta nuo -20 iki 25 °C, pasirinkant 5 °C žingsnį. Visiems skaičiavimams taikoma patalpos temperatūra yra 19,72 °C.

Išorės oro temperatūros kitimas gali būti apibūdinamas kumuliacine temperatūrų kitimo kreive. Ši kreivė (4 pav.) nusako būdingus mikroklimato sistemų veikimo taškus ir nurodo, kiek trunka tam tikros sistemos veikimas (Martinaitis *et al.* 2010). Patalpų vėdinimas, nors ir ne nuolatos, bet visose klimatinėse zonose vyksta ištisus metus, šildymo sezonas mišrioje klimatinėje zonoje trunka pusę metų laikotarpio.



4 pav. Kumuliacinė temperatūrų trukmės kreivė
Fig. 4. A distribution curve for cumulative temperatures

Vertinant vėdinimą, vėsinimas šaldant nenagrinėjimas. Kadangi vėdinimo sistemai veikti būtina energija iš-tisus metus, todėl vertinamas visas metų laikotarpis.

Pagal (Laustsen 2008) pastatai priskiriami tam tikrai klimatinei zonai. Lietuvos klimatinės sąlygos pagal skirstymą į dienolaipsnius artimos mišriai klimato zonai, kurioje maždaug po lygiai tenka vėsinimo ir šildymo dienolaipsnių.

Atitinkamai šilumnešio (srauto) pradinė temperatūra žymima indeksu „1“, o galinė – „2“. Pagal šias temperatūras nustatomas, koks yra srautas: šaltas ar karštas. Toliau tai taikoma šilumos ir masės balansų sistemoje vykstan-tiems procesams sudaryti, remiantis šilumos (masės) ba-lanso lygtimi (2):

$$Q = M_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1' - T_1'') = M_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2'' - T_2'), \quad (2)$$

čia Q – šilumos srautas, kW; c_p – šilumnešio savitoji šiluma, J/kgK; M – masinis šilumnešio debitas, kg/s; indeksu „1“ žymimas šildantysis šilumnešis, „2“ – šildomasis šilumnešis; pradinė T' ir galinė T'' šilumnešių temperatūros.

Pagal šias lygtis taip pat nustatomi nežinomi dydžiai (masinis debitas, temperatūra ar srauto savitoji šiluma). Pagal šilumos balansą į sistemą įeinančių srautų ir ją paliekančių srautų sumos turi būti lygios ($\Sigma Q' = \Sigma Q''$).

Žinant, kokie srautai ir kokie jų šiluminiai para-metrai, galima parinkti minimalų temperatūrų skirtumą. Kelios rekomendacijos, kaip pasirinkti minimalų tem-peratūrų skirtumą, pateikiamos (Kemp 2007) ir (Online

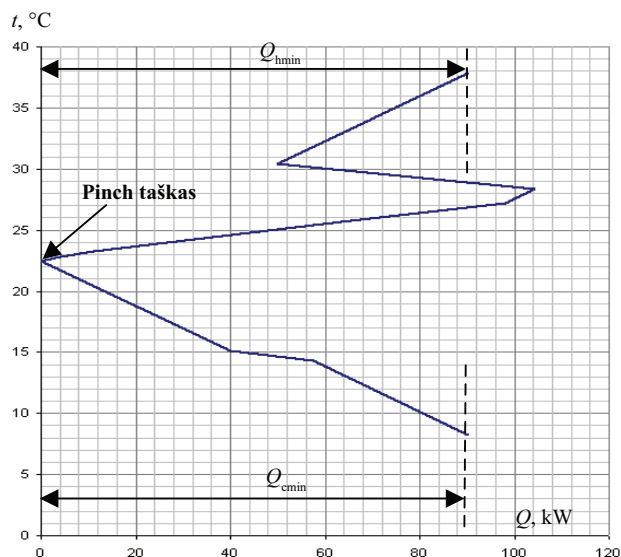
Pinch... 2011). Pirmasis būdas yra pagal srautų fizinę bū-seną, antrasis – pagal procesų pobūdį, kuriuose dalyvauja srautai. Skaičiavimams minėtas skirtumas pasirenkamas pagal pirmąjį būdą.

Žinant, kad vėdinimo sistemoje naudojami skystosios ir dujinės būsenos srautai, pasirenkamas 15 °C minimalus temperatūrų skirtumas. Minimalus temperatūrų skirtumas, taikomas procesams integruoti, gali būti interpretuojamas kaip temperatūrų skirtumas, kuris neturėtų būti mažesnis už pasirinktąjį kiekviename šilumokaičio gale.

Grafiškai *Pinch* taškas gaunamas braižant šaltų ir karštų srautų sudėtines kreives bei keičiant jų padėtį verti-kaliai absčių ašies atžvilgiu tol, kol mažiausias atstumas tarp jų atitinka numatytą / pasirinktą minimalų temperatū-rų skirtumą.

Siekiant, kad būtų galima patogiau vaizduoti rezulta-tą ir lengviau skaičiuoti, naudojama didžioji sudėtinė kreivė (5 pav.). Taikant temperatūrų modifikavimo būdą, prie šaltų srautų pradinės ir galinės temperatūros pridedama pusė minimalaus temperatūrų skirtumo, iš karštų srautų, atvirkščiai, – atimama pusė šio minimalaus temperatūrų skirtumo reikšmės. Pastarasis metodas paprastesnis, nes grafiškai sudėtinga pastumti kreives.

Pinch analizė atliekama pagal I. C. Kemp (2007) me-todikos algoritmą. 5 paveiksle pateikta didžioji sudėtinė srautų kreivė, kurioje matoma, kokia reikalinga minimali papildomų įrenginių (šildytuvų, aušintuvų) galia ir *Pinch* taško temperatūra, kuri šilumos mainų atžvilgiu yra nepa-lankiausia vykti šilumos mainams. Išskiriama *Pinch* tem-peratūra šaltiems ir karštiems srautams. Šios temperatūros



5 pav. Didžioji sudėtinė kreivė, Pinch taškas, minimalios šildymo (Q_{hmin}) ir vėsinimo (Q_{cmin}) galios

Fig. 5. Grand composite curve, Pinch point, minimal heat and cool capacity

atitinkamai gaunamos atėmus (pridėjus) pusę minimalaus temperatūrų skirtumo esant *Pinch* taško temperatūrai.

Žinant anksčiau išvardytus dydžius projektuojamas šilumokaičių tinklas. Šilumokaičių šiluminis pralaidumas nustatomas lygtimi (3) ir lyginamas pradinėje sistemoje esančių ir po procesų integracijos gautų šilumokaičių šiluminis pralaidumas.

$$Ak = \frac{Q}{\Delta T_{LM}}, \quad (3)$$

čia Ak – šilumokaičio ploto ir šilumos perdavimo koeficiento sandauga, t. y. šilumokaičio šiluminis pralaidumas, kW/K; ΔT_{LM} – vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas, K.

Šilumokaičio šiluminis pralaidumas gerai apibūdina patį šilumokaitį (jo dydį ir kainą), todėl net be detalių ekonominių skaičiavimų galima gana neblogai palyginti skaičiavimų rezultatus.

Rezultatai

Suprojektuoto pagal *Pinch* metodą šilumokaičių tinklo tinklinės diagramos visais keturiais atvejais, kai išorės oro temperatūra yra -20 °C, pavaizduota 6 paveiksle.

Virš horizontalios punktyrinės linijos pavaizduotos horizontalios linijos žymi karštus srautus, žemiau – šaltus srautus. Vertikali linija, jungianti du apskritimus, vaizduoja šilumokaitį, kurio galia ir numeris (romėniškaisiais skaitmenimis) nurodyti viršutiniame apskritime. CI, CII, HI simboliai atitinkamai reiškia vėsinimo ir šildymo įrenginius.

6 paveiksle skaitinės reikšmės, išskyrus reikšmes apskritimuose ir stulpeliuose, žymi temperatūras. Išskiriamos griežtai nustatytos ir negriežtai nustatytos temperatūros sąvokos, pirmosios turi būti būtinai išlaikomos, antrosios nebūtinai turi būti tokios, kokios numatytos. Šios temperatūros svarbios tuo, kad negriežtomis temperatūroms pasiekti gali net nereikėti įrengti specialaus įrenginio. Negriežtos temperatūros schemoje (6 pav.) pažymėtos pasviraisiais skaičiais. Vadinasi, papildomų vėsinimo (CI) įrenginių galima nevertinti, kai reikiama pasiekti proceso temperatūra yra negriežto pobūdžio, t. y. jos pasiekti nereikia. Srautų šiluminių talpų (*CP*) ir šilumos srautų (*Q*) reikšmės pateikiamos stulpeliuose.

Kadangi srautai, tarp kurių vyksta procesai, inžinerinėse sistemose yra kintamo pobūdžio, tai bendro atsakymo, kuris suprojektuotas šilumokaičių tinklas tinkamiausias, nėra, todėl prieš priimant projektinį sprendimą turi būti atliekama detali metų laikotarpio analizė. Todėl nagrinėjama, kaip kinta šilumokaičių skaičius ir jų galios kintant išorės oro temperatūrai kas 5 °C laipsnius.

1 lentelėje pateikiamos nagrinėjamos (1 pav.) vėdinimo sistemos šilumokaičių galios ir šiluminiai pralaidumai esant artimoms šaltojo metų laikotarpio projektinėms išorės oro bei vidutinėms šildymo sezono temperatūroms.

Kaip matyti iš skaičiavimo rezultatų, pateiktų 1 lentelėje, esant -20 °C temperatūrai reikalingos šilumokaičių suminės galios yra 2,6 karto didesnės, nei esant 0 °C temperatūrai.

1 lentelė. Šilumokaičių galios ir šiluminiai pralaidumai

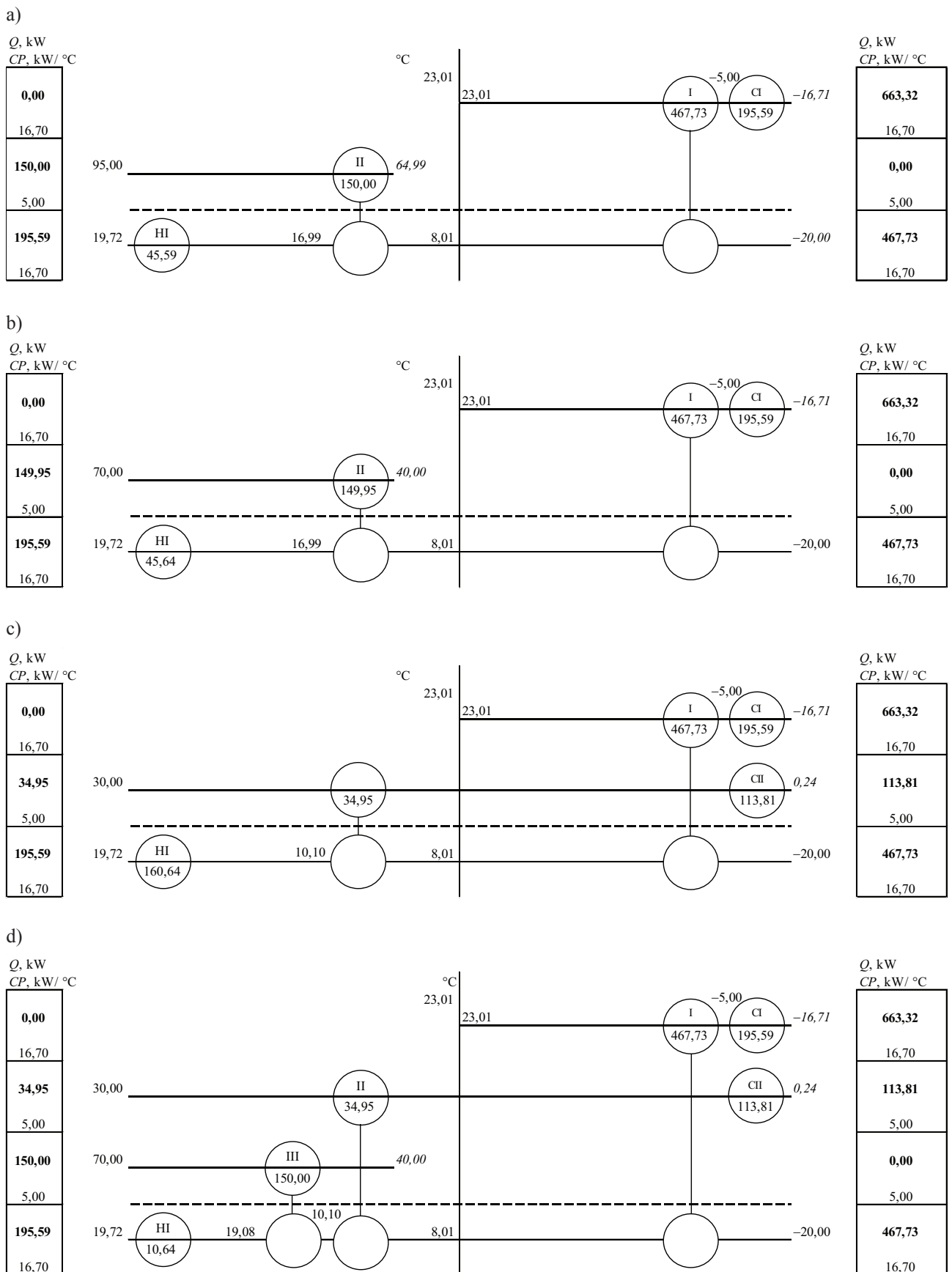
Table 1. Capacities and thermal transmittance of heat exchangers

| Θ_{es} °C | Šilumokaičiai | | |
|---------------------|---------------|-----------|------------------|
| | X | Y | Z |
| | <i>Q</i> , kW | | <i>Ak</i> , kW/K |
| -20 | 418 36 | 418 64 | 246 4 |
| 0 | 84 9 | 84 9 | 246 6 |

7 paveiksle vaizduojami skaičiai rodo pradinės sistemos šilumokaičių dydžius, išreikštus šiluminiu pralaidumu (šilumos mainų paviršiaus ploto ir šilumos perdavimo koeficiento sandauga). 7 paveiksle parodyta, kaip keičiasi jų šiluminis pralaidumas integruvus procesus buvusiuose (X, Y, Z) šilumokaičiuose, nagrinėjant keturis papildomų šilumos srautų naudojimo atvejus. Integruoti šiuo atveju reiškia projektuoti naujus šilumokaičius arba jų tinklą, naudojant skirtingų temperatūrų srautus, kurie skiriasi pagal šilumos kokybę (temperatūrą).

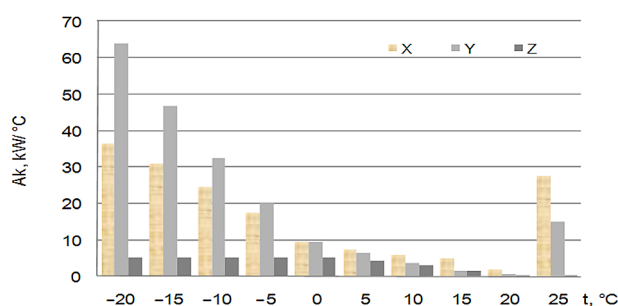
Gauti rezultatai rodo, kad X ir Y šilumokaičių šiluminis pralaidumas kintant išorės oro temperatūrai nuo -20 iki $+20$ °C mažėja. Tačiau Z šilumokaičio minėtame temperatūrų intervale šiluminis pralaidumas didėja iki 0 °C temperatūros, o pasiekus $+5$ °C, pradeda mažėti. Todėl galima teigti, kad Z šilumokaičio įtaka vėdinimo įrenginiui mažėja ir tai reiškia, kad orą, išeinantį iš šilumogrąžos įrenginio, papildomai šildyti reikia vis mažiau mažėjant oro išorės temperatūros ir patalpos oro temperatūros skirtumui.

Suprojektuotą šilumokaičių tinklą pagal *Pinch* metodiką galima optimizuoti. Kadangi ne visais atvejais galima rasti uždara kontūrą, kuris gali būti vienas iš optimizacijos būdų (A optimizavimas), taikomas B optimizavimas, kuris žymi variantą, kai bandoma pašalinti mažiausią poveikį šilumokaičių tinklui turintį šilumokaitį, kai judama nuo vieno prie kito papildomo įrenginio, esančio pagal *Pinch* metodą suprojektuotame šilumokaičių tinkle (Kemp 2007). Nereikšmingu šilumokaičiu gali tapti mažiausią galią turintis šilumokaitis.



6 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai naudojamas į šildymo sistemą tiekiamas (a), iš šildymo sistemos grąžinamas (b), technologinio proceso (c) ir abu – b) ir c) atvejais nurodyti šilumnešiai (d)

Fig. 6. A network of heat exchangers when supply for a heating system (a), from a heating system (b), for a technological process (c) and both for b and c cases agents (d) are used



7 pav. Šilumokaičių šiluminis pralaidumas prieš integruojant
Fig. 7. The thermal transmittance of heat exchangers before integration

Schemoje, pavaizduotoje 6 pav., c ir d, tokį šilumokaitį atitiktų II šilumokaitis, o optimizavimą B – trajektorija nuo CII iki HI papildomų įrenginių. 8 paveiksle pateikta šilumokaičių tinklinė diagrama po optimizavimo. Dėl optimizavimo, kai yra šalinami šilumokaičiai, padidėja išorinis aušinimas ir šildymas, mažėja atgaunamos šilumos kiekis, tačiau paprastėja tinklo konfigūracija – gerėja ekonominiai rodikliai.

Pateiktame 8 paveiksle matyti, kad šilumokaičių skaičius sumažėjo iki 2 lyginant su neoptimizuotu (6 pav.) (d) atveju šilumokaičių tinklu. Šio šilumokaičių tinklo schema pateikta 9 paveiksle.

Pavaizduotoje sistemoje papildomam šildymo įrenginiui, kuriame baigiamas šildyti tiekiamas į patalpą oras, papildomai naudojamas iš III šilumokaičio grįžtantis šilumnešis, tokiu būdu gana aukštos temperatūros ištekantis šilumnešis negražinamas iš karto į šilumos punktą.

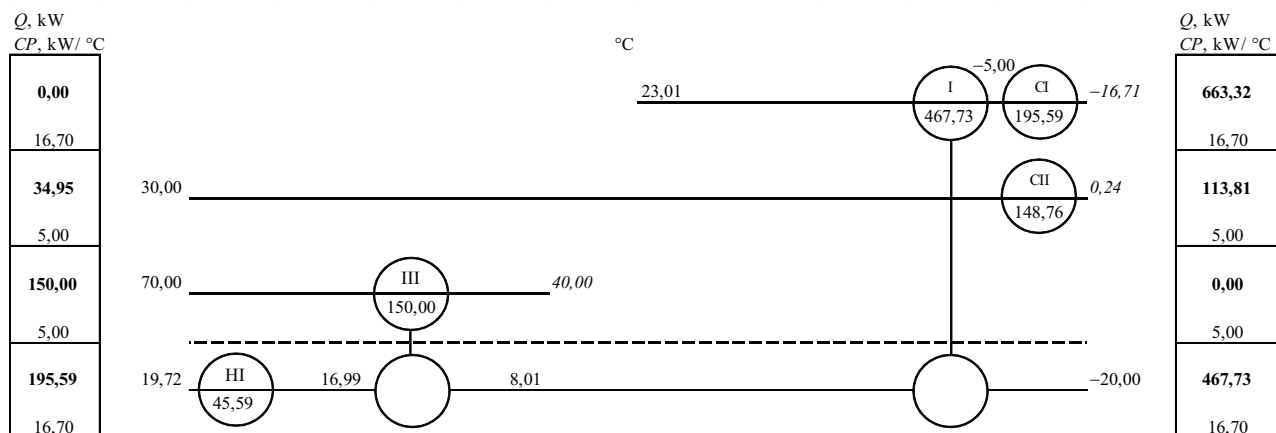
Kadangi po optimizacijos iš šilumokaičių tinklo pašalinamas II šilumokaitis, nėra būtinybės vėsinti tech-

nologinio proceso srauto, t. y. nereikia naudoti CII vėsimo įrenginio. Taip pat nebūtina atvėsinti šalinamą orą iki temperatūros $-16,71\text{ }^{\circ}\text{C}$, tam reiktų panaudoti CI vėsimo įrenginį. Todėl pakaks atvėsinti iki $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o tai užtikrina I šilumokaičio naudojimas (9 pav.).

Lyginant 1 ir 9 paveiksluose pavaizduotas schemas, galima rasti panašumų, t. y. X ir Y šilumokaičius atitinka I šilumokaitis, tačiau šiuo atveju jis sujungia oro srautus nenaudojant tarpinio šilumnešio (1 pav.), III šilumokaitis ir HI šildymo įrenginys vaizduoja Z šilumokaitį. Tačiau šilumokaičių tinkle gautame procesų sistemose taikant integraciją papildomas šilumos srautas (1 paveiksle pažymėtas taškine linija) papildomai gali būti panaudojamas dviejuose šilumokaičiuose vykdomiems šilumos mainams.

Svarbus rodiklis projektuojant šilumokaičių tinklą – galima atgauti šilumos galią, kuri lygi šilumokaičių sistemą sudarančių galių sumai. Integruojant maksimaliai galimos atgauti šilumos galia, pateikta taikant suminį šiluminį šilumokaičio pralaidumą, grafiškai pavaizduota 10 paveiksle. Šiame paveiksle vaizduojama, kaip kinta suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas naudojant skirtingus papildomus šilumos srautus. Didžiausias šiluminis pralaidumas gaunamas, kai naudojami du papildomi šilumos srautai (d atvejis). Šiuo atveju naudojamas iš šildymo sistemos grąžinamas ir technologinio proceso srautai.

Nagrinėjant 10 paveiksle pateiktus rezultatus matyti, kad nuo $+15$ iki $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros šilumokaičių po optimizacijos nebelieka, vadinasi, nereikia vykdyti jokių papildomų procesų, susijusių su šilumos naudojimu. Nors 7 paveiksle matyti, kad šilumogražos įrenginys gali būti naudojamas reversiniu režimu, t. y. atgaunant iš šalinamo iš patalpos oro vėsą.

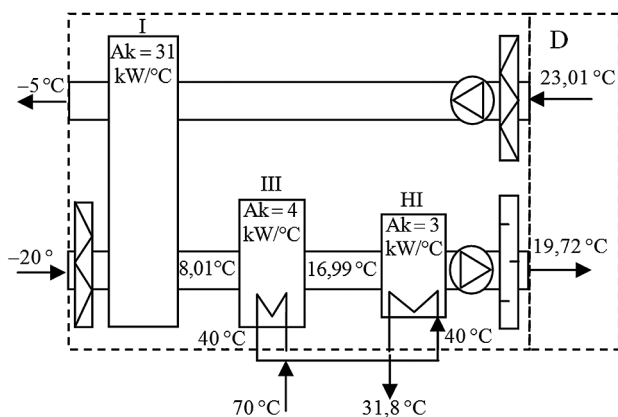


8 pav. Šilumokaičių, taikant B optimizavimą, tinklinė diagrama (d) atveju
Fig. 8. A network of heat exchangers after B optimization in case (d)

Lyginant 7 ir 10 paveiksluose pateiktus skaičiavimo rezultatus matyti, kad suintegravus vėdinimo sistemoje esančius srautus, gaunami mažesnio nei prieš tai neintegruotoje sistemoje buvusių šilumokaičių šiluminiai pralaidumai.

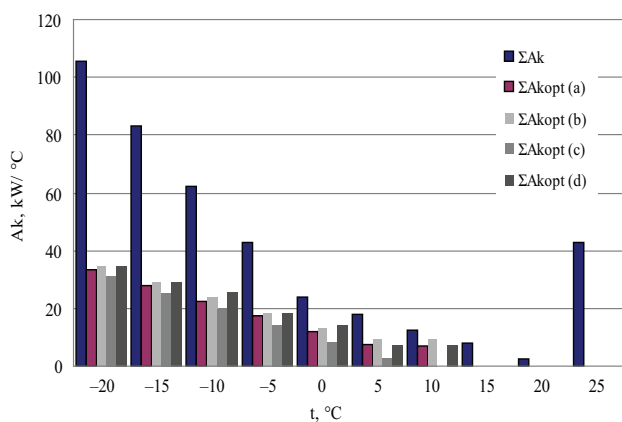
Suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas sumažėja nuo 68 iki 66 %, lyginant šilumokaičius, kai išorės oro temperatūra yra -20 ir -15 °C.

Mažesnius šilumokaičių šiluminius pralaidumus, gautus po integracijos, galima paaiškinti tuo, kad pagal *Pinch* metodą nustatant ne mažesni, nei pasirinktas minimalus temperatūrų skirtumas tarp šilumnešių šilumokaičio galuose, dėl didesnio temperatūrų skirtumo ir sumažėja šiluminis pralaidumas. Tačiau kai temperatūrų skirtumas mažesnis negu minimalus temperatūrų skirtumas, minėtasis rodiklis didėja, taip pat didėja ir paties šilumokaičio dydis.



9 pav. Šilumokaičių tinklas po integracijos

Fig. 9. A network of heat exchangers after integration



10 pav. Šilumokaičių šiluminio pralaidumo priklausomybė nuo išorės oro temperatūros

Fig. 10. The dependency of the thermal transmittance of the heat exchanger on outdoor air temperature

Išvados

1. Vėdinimo sistemose šilumogražai tinkamą ir optimalų šilumokaičių tinklą galima suformuoti jungiant įvairiose pastato inžinerinėse sistemose esančius šilumnešius.
2. Priimant projektinius sprendimus reikėtų atsižvelgti į tai, kad atgaunamos šilumos galia priklauso nuo išorės temperatūros – esant išorės oro projektinei temperatūrai 1,9 karto didesnei nei vidutinė šildymo sezono temperatūra, šilumokaičių šiluminis pralaidumas atitinkamai sumažėja apie 4 kartus.
3. Parenkant vėdinimo įrenginį su šilumograža derėtų atsižvelgti į tai, kad maksimaliu režimu įranga gali veikti tik nedidelį laiko tarpą, nes žiemos išorės oro projektinė temperatūra trunka vos keletą parų, todėl rekomenduotina įvertinti disponuojamų šilumos srautų kiekių (kitose pastato inžinerinėse sistemose), parametų ir kainų bei šiluminio pralaidumo derinį esant būdingoms temperatūroms.
4. Didžiausias suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas nagrinėtame temperatūriniame intervale gaunamas, kai integruojami keli žemesnius parametrus (temperatūras) turintys srautai (d atvejais).
5. Gauti tyrimų rezultatai gali būti taikomi mišrioje klimato zonoje esančių pastatų grupei, kurioje pastatus žiemą reikia šildyti, o vasarą – vėsinti.

Literatūra

- Biekša, D. 2008. *Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų*. daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 87 p.
- Biekša, D.; Martinaitis, V. 2004. An estimation of life cycle exergy consumption of energy – intensive microclimate conditioning systems, in *Proc. of the 6th Energy for buildings Conference, October 7–8, 2004, Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Technika, 205–219.
- Biekša, D.; Martinaitis, V. 2007. Pastato inžinerinių sistemų tyrimas taikant ekserginį sistemų vertinimo metodą, *Energetika* 53(4): 84–89.
- Biekša, D.; Martinaitis, V.; Šakmanas, A. A. 2006. An estimation of exergy consumption patterns of energy-intensive building service systems, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(1): 37–42.
- Europos Parlamentas ir Taryba 2010. 2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/EB dėl pastatų energinio naudingumo, *Europos Sąjungos oficialusis leidinys* L 153: 13–35.
- Gismeteo orų prognozė* [interaktyvus]. 2010, [žiūrėta 2011 m. birželio 27 d.]. Prieiga per internetą: <www.gismeteo.lt>.
- Jonkaitis, T.; Juodis, E. 2007. Realus ir programiškai sumodeliuotas šiluminis bei ekonominis vėdinimo sistemų šilumos atgavimo įrenginių efektyvumas, iš *Pastatų inžinerinės sistemos: respublikinės mokslinės konferencijos, įvykusios Vilniuje 2007 m. balandžio 26–27 d., medžiaga*. Vilnius: Technika, 11–19.
- Juodis, E. 2008. *Vėdinimas*. Vilnius: Technika. 400 p.

- Kemp, I. C. 2007. *Pinch Analysis And Process Integration*. 2nd ed. Elsevier Science & Technology. 416 p. ISBN 9780750682602.
- Klemeš, J. J.; Varbanova, P. S.; Pieruccib, S.; Huisinghc, D. 2010. Minimising emissions and energy wastage by improved industrial processes and integration of renewable energy, *Journal of Cleaner Production* 18(9): 843–847. doi:10.1016/j.jclepro.2010.02.028
- Laustsen, J. 2008. *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings* [online], [cited 20 June 2011]. Available from Internet: <http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf>.
- LST EN 13779:2007. *Negyvenamųjų pastatų ventiliacija. Ventiliacijos ir patalpų oro kondicionavimo sistemų eksploatacinių charakteristikų reikalavimai*. Vilnius, 2007. 72 p.
- Martinaitis, V.; Bieksa, D.; Miseviciute, V. 2010. Degree-days for the exergy analysis of buildings, *Energy and Buildings* 42(7): 1063–1069. doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.019
- Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2008. Dependence of exergy efficiency of recuperative heat exchanger on dimensionless temperature, in *The 5th Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2008)* [online]. 29 May 2008, Kaunas, Lithuania, 57–63.
- Online Pinch Analysis Tools [online]. 2011, [cited May 3 2011]. Available from Internet: <http://www.uic-che.org/pinch/about_program.php#CrossPinchMatching>.
- Parfentyeva, N.; Samarin, O.; Lushin, K.; Paulauskaite, S.; Valancius, K. 2011. Temperature efficiency of rotary heat recovery units in ventilation and air conditioning, in *The 8th International Conference "Environmental Engineering": Selected papers*, vol. 2. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 799–801.
- Pavlovskaja, O.; Juodis, E. 2006. Šalinamo vėdinimo oro šilumos atgavimo įrangos efektyvumo analizė, iš *Pastatų inžinerinės sistemos: respublikinės mokslinės konferencijos, įvykusios Vilniuje 2006 m. balandžio 27–28 d., medžiaga*. Vilnius: Technika, 81–87.
- Sakulpipatsin, P.; Itard, L. C. M.; Kooi, H. J.; Boelman, E. C.; Luscuere, P. G. 2010. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, *Energy and Buildings* 42(1): 90–99. doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.015
- Seppänen, O. 2008. Ventilation for good indoor environment and energy efficiency, *Rehva Journal* 45(3): 24–30.
- Skaisgirienė, J.; Vaitiekūnas, P. 2008. Vėdinimo sistemos šalinamo oro šilumos atgavimo efektyvumas, iš *Pastatų inžinerinės sistemos: respublikinės mokslinės konferencijos, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 24–25 d., medžiaga*. Vilnius: Technika, 32–38.
- STR 2.09.02:2005 *Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas*. Vilnius, 2005. 51 p.
- Tuomaala, M.; Hurme, M.; Leino, M. M. 2010. Evaluating the efficiency of integrated systems in the process industry case: steam cracker, *Applied Thermal Engineering* 30(1): 45–52. doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.06.024
- Tuomas, E. 2006. *Šilumos perdavimo tinklų ir pastatų vidaus šildymo, karšto vandens sistemų optimalių, saugių, efektyvių darbo režimų ir priemonių jiems įdiegti analizė bei rekomendacijų dėl šios srities teisinio reglamentavimo tobulinimo parengimas* [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. birželio 29 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.lsta.lt/files/studijos/1_ST-sistemu-darbo-rezimai.pdf>.

CASES OF INTEGRATING THERMAL TRANSMITTANCE PROCESSES INTO VENTILATION EQUIPMENT

V. Misevičiūtė, V. Martinaitis, G. Šiupšinskas

Abstract

The paper analyzes the influence of integrating the processes taking place in the ventilation equipment of a public building on the thermal transmittance of heat exchangers. Pinch analysis helped with determining changes in the thermal transmittance of heat exchangers per year. The article examines the dependency of the thermal transmittance of heat exchangers on the disposed quantity of streams. The total thermal transmittance of heat exchangers is higher if several streams of lower parameters are used. Without additional economical calculations, the thermal transmittance of heat exchangers can assess their size, price and be used for the purposes of comparing the obtained results showing that designing such systems is useful for evaluating the possibilities of integrating the processes taking place in ventilation equipment.

Keywords: ventilation system, heat recovery, thermal transmittance, processes integration, Pinch analysis.